

На правах рукописи

Шлюгаев Алексей Юрьевич

**Математические модели и алгоритмы оптимизации
стратегий однопроцессорного обслуживания
пространственно рассредоточенной
группировки стационарных объектов**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород

2008

Работа выполнена на кафедре Информатики, систем управления и телекоммуникаций Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Волжская государственная академия водного транспорта».

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор **Федосенко Юрий Семенович**

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор **Коган Дмитрий Израилевич**

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор **Прилуцкий Михаил Хаимович**

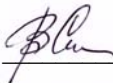
кандидат физико-математических наук,
доцент **Шапошников Дмитрий Евгеньевич**

Ведущая организация:
Вычислительный центр им. А.А.Дородницына РАН

Защита состоится « 13 » ноября 2008 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.166.13 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент  **В.П. Савельев**

Общая характеристика работы

Растущие требования к экономической эффективности промышленных комплексов различного назначения предопределяют необходимость повышения качества реализации их транспортно-технологического обслуживания (ТТО), обычно являющегося неотъемлемой составляющей производственных процессов.

Значительная часть управленческих решений, принимаемых по ТТО, заключается в планировании и диспетчеризации процессов транспортировки и последующей обработки (обслуживании) материальных сущностей (объектов) одним или несколькими обслуживающими приборами – процессорами. При несвоевременном обслуживании может нарушаться нормальное в том или ином смысле функционирование объектов.

Актуальным направлением повышения эффективности реализации ТТО является формирование управленческих решений на базе адекватных математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов и программных комплексов.

Как следует из работ, посвященных моделированию и оптимизации ТТО, их адекватное математическое описание для достаточно обширного класса производственных ситуаций может быть выполнено в рамках дискретных моделей обслуживания конечных детерминированных потоков объектов, т.е. на традиционном для теории расписаний языке. Точность такого моделирования определяется выбором шага дискретности пространственных и временных параметров, а синтез оптимальных стратегий (расписаний обслуживания) принципиально осуществим комбинаторными методами дискретного программирования.

Научные исследования по данному направлению базируются на фундаментальных работах по теории расписаний, в том числе М. Garey, D. Johnson, E.G. Coffman, R.L. Graham, W.L. Maxwell, В.С. Гордона, М.Я. Ковалева, В.С. Танаева, Я.М. Шафранского, В.В. Шкурбы. Применительно к различным задачам управления ресурсами, и в частности оптимизации ТТО, дискретные математические модели и решающие алгоритмы исследовались в работах Д.И. Батищева, А.С. Беленького, В.Н. Буркова, Э.Х. Гимади, Р.В. Игудина, Д.И. Когана и Ю.С. Федосенко, А.В. Кононова, А.А. Корбута, А.А. Лазарева, С.Е. Ловецкого, Т.П. Подчасовой, М.Х. Прилуцкого, И.Х. Сигала, М.В. Ульянова, Ю.Ю. Финкельштейна, В.Р. Хачатурова и других авторов.

Ряд математических моделей обслуживания потоков объектов в системе независимых процессоров изучался А.В. Шеяновым и А.В. Курановым.

В контексте тематики диссертационной работы особо следует упомянуть сравнительно недавно опубликованные исследования

А.В. Синего, Н. Shen и Р. Tsiotras, посвященные моделированию технологий обслуживания группировок объектов подвижным процессором. Однако указанные модели покрывают лишь отдельные случаи возможных производственных ситуаций. В частности, в работах А.В. Синего рассматриваются модели однопроцессорного двухрейсового обслуживания объектов в *одномерной* зоне с запретом возвратных движений, а в публикациях Н. Shen и Р. Tsiotras для дискретной модели обслуживания объектов в кольцевом одномерном участке решается оптимизационная задача дозправки орбитальной группировки спутников.

В отличие от вышеуказанных работ основное внимание в данной диссертации уделено моделированию и синтезу оптимальных стратегий однопроцессорного обслуживания объектов в крупномасштабных производственных комплексах с *универсальной структурой*, определяемой односвязным неориентированным взвешенным графом: вершины графа соответствуют точкам расположения объектов, а веса ребер – расстояниям между парами смежных точек (т.е. таких, между которыми осуществимо непосредственное перемещение процессора). При этом не ограничивается число транзитных перемещений процессора через точки расположения объектов.

Такого рода ТТО характерно, в частности, для крупномасштабных грузообразующих районов внутреннего водного транспорта (КГР), в которых плавучими дизель-электрическими добывающими комплексами (ПДК) осуществляется массовая русловая разработка нерудных строительных материалов (НСМ). Для иллюстрации на рис. 1 представлена схема расположения группировки ПДК в условном КГР, на которой числа от 1 до 14 идентифицируют персональный состав добывающих комплексов.

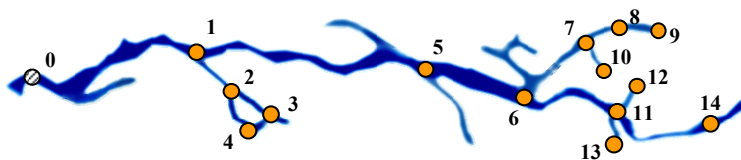


Рис. 1. Пример расположения группировки ПДК в КГР

КГР характеризуются высоким темпом изменения оперативной обстановки, который, как следствие, налагает достаточно жесткие ограничения не только на адекватность информационной среды принятия решений, но и на скорость автоматизированного формирования их проектов. Поэтому в диссертационной работе построение и исследование математических моделей обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов выполнено с учетом отмеченных выше особенностей.

Целью работы является построение и исследование базовых математических моделей и вычислительных алгоритмов, а также разработка комплекса программных средств синтеза оптимальных и субоптимальных стратегий однопроцессорного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов. Решение данных задач создает теоретическую основу для создания систем поддержки оперативного планирования и диспетчеризации ТТО. В диссертационной работе – там, где целесообразна содержательная интерпретация изучаемых задач, рассматриваются процессы снабжения дизельным топливом группировки ПДК, пространственно рассредоточенной в КГР.

В основе моделирования ТТО лежит идеология описания транспортно-технологических процессов на языке обслуживания подвижным процессором P совокупности O_n объектов, расположенных в вершинах односвязного неориентированного взвешенного графа G . Рассмотрены следующие конфигурации и технологии.

1. Граф G имеет произвольную структуру, и на технологию обслуживания объектов группировки O_n процессором P не налагается каких-либо специальных ограничений (модель $\mathcal{M}_{general}$).

2. Граф G имеет древовидную структуру, а обслуживание всех объектов группировки O_n осуществляется в процессе реализации двух рейсов между выделенными концевыми вершинами – прямого и обратного (модель \mathcal{M}_{tree}).

3. Граф G представим в виде цепи из m непересекающихся подграфов, и выделена последовательность ребер, а также инцидентных им вершин, называемых главной магистралью M ; остальные ребра и инцидентные им вершины именуется боковыми ответвлениями. Обслуживание всех объектов группировки O_n осуществляется в процессе реализации двух рейсов – прямого (в порядке возрастания номеров вершин M) и обратного (в порядке убывания номеров вершин M) с попутным обслуживанием объектов, расположенных в соответствующих боковых ответвлениях (модель \mathcal{M}_{w+}).

Достижение поставленной цели диссертационной работы требует рассмотрения следующих задач:

- обзор литературы по теме исследования;
- разработка адекватных математических моделей обслуживания подвижным процессором пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов;
- постановка экстремальных задач синтеза оптимальных стратегий обслуживания и оценка их вычислительной сложности;

– разработка и реализация алгоритмов синтеза оптимальных и субоптимальных стратегий обслуживания с приемлемыми для решения практических задач характеристиками;

– создание программного комплекса поддержки оперативного планирования обслуживания подвижным процессором пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов.

Научная новизна работы состоит в следующих выносимых на защиту основных результатах.

1. Разработаны базовые математические модели одностадийного однократного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов подвижным процессором, адекватно описывающие, в том числе типовые схемы снабжения топливом (бункеровок) ПДК в крупномасштабных районах массовой русловой добычи НСМ.

2. В рамках моделей п.1 сформулированы и исследованы экстремальные задачи синтеза оптимальных стратегий обслуживания.

3. Для задач п. 2 разработаны вычислительные алгоритмы синтеза оптимальных и субоптимальных стратегий, обладающие достаточными для практических приложений значениями скоростных и емкостных характеристик.

4. Изучены особенности разбиения плоскости параметров математических моделей обслуживания п. 1 на области устойчивости по структуре оптимальных стратегий.

5. Разработан программный комплекс, реализующий средствами п. 2 синтез оптимальных и субоптимальных решений для математических моделей п 1.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечена разработанными математическими моделями, адекватно описывающими рассматриваемый класс технологий ТТО, применяемой методикой исследования, корректной реализацией математического аппарата и выполненными вычислительными экспериментами.

Практическая значимость диссертационной работы выражается в том, что разработанные математические модели, вычислительные алгоритмы и программный комплекс могут быть использованы в исследовательских, производственных и тренажерных компьютерных системах, предназначенных для решения задач оптимизации стратегий обслуживания пространственно рассредоточенных группировок объектов.

Реализация результатов работы. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с Федеральной целевой программой "Электронная Россия" (2002 – 2010 гг.). Её результаты послужили

основой для проектирования систем поддержки организационного управления в Уфимском речном порту, а также используются в учебном процессе студентами специализации «Информационные и телекоммуникационные системы на транспорте» в Волжской государственной академии водного транспорта и специальности «Прикладная информатика» на факультете Вычислительной математики и кибернетики Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

– Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы использования и развития новых информационных технологий в России» (Нижний Новгород, 2005);

– Нижегородские сессии молодых ученых. Технические науки (Нижний Новгород, 2006, 2007, 2008);

– Нижегородские сессии молодых ученых. Математические науки (Нижний Новгород, 2006, 2007);

– Международные научно-технические конференции «Информационные системы и технологии – ИСТ» (Нижний Новгород, 2006, 2007, 2008);

– Научные конференции «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (Нижний Новгород, 2006, 2007, 2008);

– Международные конференции «Идентификация систем и задачи управления – SICPRO» (Москва, 2007, 2008);

– V Московская международная конференция по исследованию операций – ORM'2007 (Москва, 2007);

– 9-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2007 / ICEF» (Нижний Новгород, 2007);

– XV Международная конференция «Проблемы теоретической кибернетики» (г. Казань, 2008 г.);

– Восьмой международный симпозиум «Интеллектуальные системы» – INTELS'2008 (Нижний Новгород, 2008);

– 22nd European Conference on Operational Research – EURO 2007 (Prague, Czech republic, 2007).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы и ее результаты полностью отражены в 20 работах [1–20], опубликованных соискателем лично или в соавторстве в научных изданиях, в том числе в двух статьях [5, 15], представленных в ведущих рецензируемых изданиях, из перечня ВАК РФ¹.

¹ http://vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/VAK/files_help_desk/per-04-2008.doc

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и 6 приложений; содержит 202 страницы текста и 65 рисунков; библиографический список включает 116 источников.

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность исследования, формулируется цель работы, раскрывается научная и практическая значимость полученных результатов. Аннотировано, по главам излагается обзор содержания диссертации.

В первой главе (Дискретные математические модели и методы решения задач однопроцессорного обслуживания) рассматриваются классические задачи однопроцессорного обслуживания и приводятся обзор методов их решения.

В § 1.1 приведен обзор моделей однопроцессорного обслуживания, а также формальных постановок соответствующих экстремальных задач и решающих алгоритмов. Рассмотрены задачи: однопроцессорного обслуживания множества объектов (задача мастера и общая задача с критерием суммарного штрафа); обслуживания потока объектов; однопроцессорного обслуживания линейно рассредоточенной группировки стационарных объектов². Также приведены формулировки задач, родственных классу задач однопроцессорного обслуживания: задачи коммивояжера³, задачи построения максимального по быстродействию расписания с учетом длительностей переналадок и задачи определения оптимальной очередности обслуживания объектов с учетом замены оборудования⁴.

В § 1.2 даны общие сведения о методах решения задач однопроцессорного обслуживания, использованных при разработке алгоритмов в рамках диссертационного исследования – динамического программирования, ветвей и границ, локальной оптимизации, а также об идеологиях эволюционно-генетического и «жадного» поиска.

Во второй главе (Общая математическая модель и вычислительные алгоритмы синтеза оптимальных стратегий однопроцессорного обслуживания группировки стационарных объектов) рассматривается задача одностадийного однократного обслуживания без

² Коган Д.И., Синий А.В., Федосенко Ю.С. Задачи оптимального обслуживания группы стационарных объектов, расположенных в одномерной зоне // Вестник ВГАВТ. Межвузовская серия: Моделирование и оптимизация сложных систем. – Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ». – 2004. – Вып. 9. – С. 27–34.

³ Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. Вопросы теории // Автоматика и телемеханика. – 1989. – №9. – С. 3–33.

⁴ Абайылданов К.Н., Астахов Н.Д., Сигал И.Х. Задача определения оптимальной очередности обслуживания объектов с учетом замены оборудования // Известия АН СССР. Технич. кибернетика. – 1986. – №4. – С. 37–39.

прерываний пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов: строится дискретная математическая модель обслуживания, формулируется экстремальная задача, разрабатываются алгоритмы синтеза оптимальной стратегии обслуживания, приводятся примеры их реализаций и результаты вычислительных экспериментов.

§ 2.1 посвящен описанию содержательной постановки задачи (п. 2.1.1) и построению общей математической модели $\mathcal{M}_{general}$ (п. 2.1.2). В п. 2.1.3. ставится экстремальная задача синтеза оптимальной стратегии однократного одностадийного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов подвижным процессором.

Основными элементами дискретных моделей процессов обслуживания, рассматриваемых в диссертационной работе, являются n -элементная совокупность O_n независимых стационарных объектов, расположенных в вершинах связного неориентированного графа G с базисной вершиной 0, и обслуживающий их подвижный процессор P , в начальный момент времени находящийся в вершине 0. В качестве иллюстрации граф G для схемы на рис. 1 представлен на рис. 2.

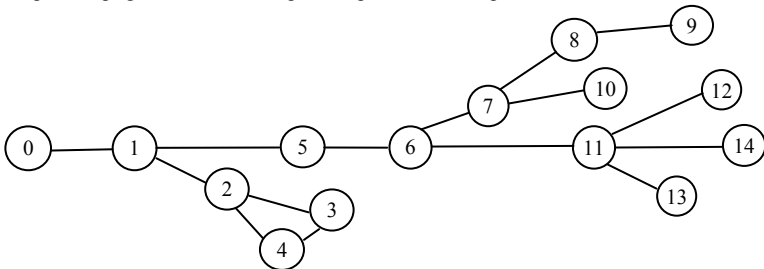


Рис. 2. Графовая модель расположения группировки объектов

Считается известной матрица $V=\{v(i, j)\}$ размерности $(n+1) \cdot (n+1)$, где $v(i, j)$ – продолжительность перемещения процессора из вершины i в вершину j графа G непосредственно ($v(i, j) = \infty$, если такое перемещение недопустимо). Также известны элементы матрицы $L=\{l(i, j)\}$ – продолжительностей перемещений по кратчайшему пути между каждой парой вершин и матрицы предшествования $\Pi=\{\pi(i, j)\}$, необходимой для построения кратчайших путей (матрицы L и Π получаются из матрицы V путем применения алгоритма Флойда).

Для каждого объекта $o(i)$ ($i = \overline{1, n}$) известен момент времени $t(i)$, начиная с которого осуществимо его обслуживание; заданы функции: $\tau(i, t)$ – продолжительности обслуживания, если оно начинается в момент t , и $\varphi(i, \bar{t})$ – индивидуального штрафа за обслуживание, завершающееся в момент \bar{t} . Указанные функции являются монотонно возрастающими по

второму аргументу (в нестрогом смысле). При постановке вычислительных экспериментов использовался типичный для практических приложений способ задания функций продолжительностей обслуживания в виде констант ($\tau(i, t) = dt(i)$) и функций индивидуального штрафа в виде кусочно-линейных зависимостей вида

$$\varphi(i, \bar{t}) = \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} \leq td(i), \\ a(i) \cdot (\bar{t} - td(i)) & \text{при } \bar{t} > td(i). \end{cases}$$

Здесь $dt(i)$ – продолжительность обслуживания объекта $o(i)$, $td(i)$ – момент времени, начиная с которого начисляется штраф ($td(i) \geq t(i) + dt(i)$), $a(i)$ – величина штрафа в единицу времени. На содержательном уровне $td(i)$ соответствует моменту начала непроизводительного простоя i -го ПДК по причине исчерпания запаса топлива, $t(i)$ соответствует моменту возникновения потребности в бункеровке, а $a(i)$ – эксплуатационные расходы на содержание ПДК в единицу времени (удельная величина штрафа).

Под стратегией обслуживания процессором P объектов совокупности O_n понимается перестановка $\rho = (i_1, i_2, \dots, i_n)$ элементов множества $\{1, 2, \dots, n\}$; объект совокупности O_n с номером i_k согласно стратегии ρ обслуживается k -м по очереди ($k = \overline{1, n}$).

Обозначим через $t_{\text{нач}}(\rho, i_k)$ и $t^*(\rho, i_k)$ соответственно моменты начала и завершения обслуживания объекта $o(i_k)$ при реализации стратегии ρ ; образуемую ими совокупность $\chi(\rho) = \{[t_{\text{нач}}(\rho, i_k), t^*(\rho, i_k)], k = \overline{1, n}\}$ интервалов будем называть реализацией стратегии ρ . Считается, что допустимая реализация стратегии ρ удовлетворяет следующим условиям:

- 1) реализация стратегии ρ компактна;
- 2) все перемещения процессора P между вершинами графа G осуществляются по кратчайшему пути;
- 3) запрещены прерывания при обслуживании объектов;
- 4) в единицу времени осуществимо обслуживание не более одного объекта.

Таким образом, имеют место соотношения:

$$\begin{aligned} t_{\text{нач}}(\rho, i_1) &= \max\{l(0, i_1); t(i_1)\}; \\ t^*(\rho, i_k) &= t_{\text{нач}}(\rho, i_k) + \tau(i_k, t_{\text{нач}}(\rho, i_k)), \quad k = 1, 2, \dots, n; \\ t_{\text{нач}}(\rho, i_k) &= \max\{t^*(\rho, i_{k-1}) + l(i_{k-1}, i_k); t(i_k)\}, \quad k = 2, 3, \dots, n. \end{aligned}$$

Совокупный штраф по всем объектам совокупности O_n , обслуживаемым согласно стратегии ρ , есть $Q(\rho) = \sum_{q=1}^n \varphi(q, t^*(\rho, q))$.

Требуется найти стратегию ρ^* , которая доставляет минимальное значение функции $Q(\rho)$, т.е. найти решение следующей однокритериальной проблемы

$$\min_c Q(c). \quad (1)$$

В заключении § 2.1 доказано, что задача (1) относится к классу NP-трудных в сильном смысле (п. 2.1.4).

§ 2.2 посвящен решению экстремальной задачи (1) на основе идеологии динамического программирования. В п. 2.2.1 выводятся решающие рекуррентные соотношения:

$$\Sigma(0, 0, \emptyset) = 0.$$

$$\Sigma(t, i, S) = \min_{o(j) \in S} \{ \Sigma^P(D^*(i, t) - l(j, i), j, S \setminus \{o(j)\}) + \varphi(i, t) \}. \quad (2)$$

В формуле (2)

$$\Sigma^P(t, i, S, j) = \begin{cases} \Sigma(D^*(i, t) - l(j, i), j, S \setminus \{o(j)\}), & \text{при } D^*(i, t) > t(i), \\ \min_{t_p \in T_p} \{ \Sigma(t_p, j, S \setminus \{o(j)\}) \}, & \text{при } D^*(i, t) = t(i), \end{cases}$$

где через T_p обозначен целочисленный отрезок $[t(j) + \tau(j, t(j)), D^*(i, t) - l(j, i)]$. Через $\Sigma(t, i, S)$ обозначена минимально возможная величина суммарного штрафа за обслуживание объектов совокупности $S \cup \{o(i)\}$ при условии, что в момент времени t завершено обслуживание объекта $o(i)$, а S – совокупность тех объектов из O_n , которые были обслужены раньше, чем $o(i)$.

Оптимальное значение Q_{opt} критерия $Q(\rho)$, соответствующее решению задачи (1), есть

$$Q_{\text{opt}} = \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \Sigma(t, i, O_n \setminus \{o(i)\}).$$

В п. 2.2.2 излагается алгоритм $\mathcal{D}\mathcal{P}$ синтеза оптимальных стратегий, а пункт 2.2.3 посвящен описанию условий и результатов вычислительных экспериментов, целью которых являлось определение средней продолжительности t_c отработки и расходуемого объема памяти V алгоритма $\mathcal{D}\mathcal{P}$.

В табл. 1 приведены статистические значения указанных показателей для значений размерности группировки O_n из диапазона $n \in [8; 12]$: минимальное и максимальное значения (указаны в квадратных скобках), среднее значение в тестовом наборе задач приведено через запятую после квадратных скобок.

Числовые характеристики решаемых задач генерировались случайным образом по равномерному закону распределения из следующих диапазонов значений (типовых значений параметров КГР):

$$t(i) \in [20, 180], dt(i) \in [1, 10], td(i) \in [t(i) + dt(i) + 1, t(i) + dt(i) + 10], \\ a(i) \in [2, 10], v(i, j) \in [4, 20].$$

При проведении вычислительных экспериментов использовалась компьютерная рабочая станция, имеющая x86-совместимую аппаратную архитектуру, с процессором Celeron 1700 Mhz и оперативной памятью объемом 512 Mb.

Таблица 1

Статистические значения t_c и V

n	t_c, c	V, Kb
8	[0.078; 0.656], 0.334	[5.273; 24.416], 13.839
9	[0.892; 5.498], 2.256	[27.685; 78.799], 48.610
10	[5.919; 82.929], 29.199	[79.664; 231.730], 139.807
11	[66.957; 1168.51], 307.59	[204.38; 858.16], 407.77
12	[993.48; 9209.08], 2867.11	[818.64; 2446.53], 1186.45

Как следует из данных табл. 1, область практического применения алгоритма $\mathcal{D}\mathcal{P}$ для синтеза оптимальных стратегий обслуживания при соблюдении 15-минутного регламента отработки ограничивается группировками, включающими до 11 объектов.

В п. 2.2.4 введено понятие элементарной стратегии обслуживания подвижным процессором группировки O_n стационарных объектов, нередко используемой на практике опытными диспетчерами, и приведены сравнительные результаты оценки эффективности оптимальной и элементарной стратегий обслуживания.

На примерах показано, что при реализации оптимальной стратегии обслуживания снижение суммарного штрафа может достигать 60% (от его значения на элементарной стратегии обслуживания), а в сравнении с «патологически плохими» стратегиями уменьшение суммарного штрафа может происходить на 2–3 порядка.

§ 2.3 посвящен решению экстремальной задачи на основе идеологии метода ветвей и границ. В п. 2.3.1 излагается алгоритм $\mathcal{B}\cdot\mathcal{B}$ синтеза оптимальных стратегий, а в пункте 2.3.2 приводятся полученные в ходе вычислительных экспериментов статистические значения средней продолжительности t_c отработки, расходуемого объема памяти V , а также средней продолжительности t_R от момента начала работы до момента последнего улучшения значения рекорда алгоритма $\mathcal{B}\cdot\mathcal{B}$.

Согласно полученным статистическим данным, максимальная размерность группировки, при которой синтез решения алгоритмом $\mathcal{B}\cdot\mathcal{B}$

укладывается в 15-минутный регламент отработки, составляет 15 объектов, т.е. на 4 единицы больше, чем у алгоритма $\mathcal{D}\mathcal{P}$. В то же время при $16 \leq n \leq 40$ время последнего улучшения значения рекорда в среднем не превосходит 8 мин, т.е. в течение примерно половины времени отработки алгоритма дальнейшего улучшения значения рекорда не происходит. Поэтому при $16 \leq n \leq 40$ алгоритм $\mathcal{B}_i\mathcal{B}$ (с ограничением на максимальную длительность отработки) может использоваться в качестве эвристической процедуры синтеза решения. Соответствующая оценка качества приближения оптимума в сравнении с другими эвристиками приводится в §§ 3.1–3.3.

§ 2.4 посвящен решению экстремальной задачи на основе совместного применения методов динамического программирования и ветвей и границ⁵. В п. 2.4.1 излагается комбинированный алгоритм $\mathcal{D}\mathcal{P}+\mathcal{B}_i\mathcal{B}$ синтеза оптимальных стратегий, а в пункте 2.4.2 приводятся полученные в ходе вычислительных экспериментов статистические значения t_c и V алгоритма $\mathcal{D}\mathcal{P}+\mathcal{B}_i\mathcal{B}$.

Из полученных статистических данных следует, что введение в алгоритм $\mathcal{D}\mathcal{P}$ дополнительного отсека бесперспективных вариантов на основе нижней и верхней оценок значения $Q(\rho)$ позволило увеличить максимальную размерность задачи (при которой синтез оптимальной стратегии укладывается в 15-минутный регламент) до 15 объектов, т.е. на 4 единицы больше, чем алгоритм $\mathcal{D}\mathcal{P}$. Также оказалось, что при $n \leq 15$ средняя продолжительность синтеза алгоритмом $\mathcal{D}\mathcal{P}+\mathcal{B}_i\mathcal{B}$ существенно меньше, чем алгоритмом $\mathcal{B}_i\mathcal{B}$. Поэтому с точки зрения практического применения для синтеза оптимальной стратегии обслуживания наиболее предпочтительным является алгоритм $\mathcal{D}\mathcal{P}+\mathcal{B}_i\mathcal{B}$.

§ 2.5 посвящен оценке устойчивости по структуре стратегий обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов. В п. 2.5.1 введено понятие устойчивости по структуре стратегии обслуживания, в п. 2.5.2 изложена процедура построения карт устойчивости по структуре, а в п. 2.5.3 построены примеры плоских сечений карт устойчивости по структуре оптимальных стратегий в пространстве параметров модели.

Ниже в табличной форме представлен пример сечения карты устойчивости оптимальных стратегий

$\rho_1 = (4, 5, 7, 8, 6, 2, 3, 1)$	$\rho_2 = (4, 5, 7, 8, 2, 3, 6, 1)$	$\rho_3 = (4, 5, 7, 8, 2, 6, 3, 1)$
$\rho_4 = (5, 7, 4, 8, 6, 2, 3, 1)$	$\rho_5 = (5, 7, 4, 8, 2, 6, 3, 1)$	$\rho_6 = (5, 7, 4, 8, 2, 3, 6, 1)$

⁵ Алексеев О.Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

в плоскости изменений Δl_0 и Δl_6 продолжительностей перемещений процессора из точек дислокации объектов $o(0)$ и $o(6)$ (табл. 2); границы областей устойчивости выделены утолщенными линиями, при этом в каждой ячейке таблицы приведены соответствующие оптимальной стратегии значения суммарного штрафа.

Таблица 2

Пример сечения карты устойчивости по структуре оптимальных стратегий

$\Delta l_6 \backslash \Delta l_0$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	818	829	838	846	854	863	871	874	875	876	877	878	879
1	818	829	838	846	854	863	871	874	875	876	877	878	879
2	818	829	838	846	854	863	871	874	875	876	877	878	879
3	ρ_1	829	838			863	871	874	875			878	879
4	ρ_1	829	838		ρ_2	863	871	874	875		ρ_3	878	879
5	833	844	853	861	869	878	886	889	890	891	892	893	894
6	847	858	867	875	883	892	900	903	904	905	906	907	908
7	865	876	885	893	901	910	918	921	922	923	924	925	926
8	878	889	898	906	914	923	931	934	935	936	937	938	939
9		889	898			923	931	934	935			938	939
10	ρ_4	889	898		ρ_5	923	931	934	935		ρ_6	938	939
11		899	908			933	941	944	945			948	949
12	897	908	917	925	933	942	950	953	954	955	956	957	958

В § 2.6 данные о значимых с точки зрения практического применения характеристиках алгоритмов $\mathcal{D}\mathcal{P}$, $\mathcal{B}_s\mathcal{B}$, $\mathcal{D}\mathcal{P}+\mathcal{B}_s\mathcal{B}$ сведены в единую таблицу (табл. 3). В столбцах этой таблицы для каждого алгоритма приведены тип отыскиваемой стратегии (оптимальная или субоптимальная) и максимальная размерность группировки, при которой синтез решения укладывается в 15-минутный регламент отработки.

Таблица 3

Вычислительные характеристики алгоритмов

Алгоритм	Тип стратегии	Максимальная размерность группировки
$\mathcal{D}\mathcal{P}$	оптимальная	11
$\mathcal{B}_s\mathcal{B}$	оптимальная / субоптимальная	15 / 40
$\mathcal{D}\mathcal{P}+\mathcal{B}_s\mathcal{B}$	оптимальная	15

На основе представленной в табл. 3 информации, даны следующие рекомендации по выбору алгоритмов из числа \mathcal{DP} , $\mathcal{B}\mathcal{B}$ и $\mathcal{DP}+\mathcal{B}\mathcal{B}$ в зависимости от оперативной обстановки принятия решений.

1. При $n \leq 15$ оптимальная стратегия может быть найдена либо при помощи алгоритма $\mathcal{B}\mathcal{B}$, либо $\mathcal{DP}+\mathcal{B}\mathcal{B}$. Однако поскольку при $n \leq 15$ средняя продолжительность синтеза алгоритмом $\mathcal{DP}+\mathcal{B}\mathcal{B}$ меньше, чем алгоритмом $\mathcal{B}\mathcal{B}$, для синтеза оптимальной стратегии обслуживания предпочтительным является алгоритм $\mathcal{DP}+\mathcal{B}\mathcal{B}$.

2. При $n > 15$ алгоритм $\mathcal{B}\mathcal{B}$ с ограничением максимальной продолжительности синтеза может использоваться в качестве эвристической процедуры синтеза субоптимальных стратегий обслуживания.

В третьей главе (Алгоритмы синтеза субоптимальных стратегий обслуживания) рассматриваются алгоритмы синтеза субоптимальных стратегий обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов, позволяющие в рамках ограничений на максимальное время отработки осуществить синтез стратегий обслуживания для задач повышенной размерности. Для каждого алгоритма приводятся полученные статистические значения продолжительности t_c отработки и расходимого объема V оперативной памяти. Также приводятся статистические значения относительного отклонения ε суммарного штрафа от оптимума либо рекорда метода ветвей и границ, а также процент ω вычислительных экспериментов, в которых значение штрафа совпало с оптимумом (рекордом).

В § 3.1 приводится описание и результаты вычислительного тестирования эвристического алгоритма \mathcal{UC} , основанного на совместном применении совокупности алгоритмов «жадного» типа и алгоритма локального поиска. Согласно полученным статистическим данным при $16 \leq n \leq 40$ погрешность приближенных решений, получаемых алгоритмом \mathcal{UC} , относительно рекорда алгоритма $\mathcal{B}\mathcal{B}$ в среднем не превышала 7% и в более чем 80% экспериментов не превышала 10%. Также показывается, как общая идея локального поиска может быть использована для «улучшения» начальных решений, задаваемых лицом, принимающим решения (ЛПР).

§ 3.2 посвящен описанию и результатам вычислительного тестирования алгоритма $\mathcal{DP}\mathcal{D}$ синтеза субоптимальных стратегий обслуживания, основанного на концепции d-расписания⁶; при этом в

⁶ Коган, Д.И., Федосенко Ю.С. Задача диспетчеризации: анализ вычислительной сложности и полиномиально разрешимые подклассы // Дискретная математика. – 1996. – Т. 8. – №3. – С. 135–147.

качестве начальной нумерации объектов использовались стратегии, отыскиваемые алгоритмом \mathcal{U} . Временная вычислительная сложность процедуры синтеза d-расписаний оценивается величиной ($O(n^2)$). Поэтому построенный на этой концепции алгоритм $\mathcal{D}\mathcal{P}\mathcal{D}$ оказался приемлемым по быстродействию для практических приложений. Согласно данным вычислительных экспериментов предельное значение размерности задачи, при которой синтез решения укладывается в 15-минутный регламент отработки, находится в пределах интервала [25, 30]. Что же касается оценки относительного отклонения штрафа от оптимума (либо рекорда метода ветвей и границ), то по крайней мере в 90% случаев оно не превышает 10%, а в среднем – 6%.

В § 3.3 излагается алгоритм синтеза субоптимальных стратегий обслуживания $\mathcal{S}\mathcal{A}$, построенный в рамках идеологии эволюционно-генетического поиска, и приводятся результаты его тестирования. В число особенностей начальной популяции алгоритма $\mathcal{S}\mathcal{A}$ включались стратегии, отыскиваемые в процессе работы эвристического алгоритма \mathcal{U} .

Согласно данным вычислительных экспериментов среднее относительное отклонение штрафа от оптимума (рекорда) не превышает 5% и в более чем в 94% случаев максимальное относительное отклонение не превышает 10%. Кроме того, отыскиваемые алгоритмом $\mathcal{S}\mathcal{A}$ стратегии имеют в среднем на 1,0–1,5% меньший штраф по сравнению со стратегиями, синтезируемыми алгоритмом \mathcal{U} .

Учитывая эти данные, а также то обстоятельство, что максимальная продолжительность синтеза алгоритмом $\mathcal{S}\mathcal{A}$ вплоть до $n = 40$ не превышает 196 с, алгоритм $\mathcal{S}\mathcal{A}$ может быть рекомендован для оперативного синтеза субоптимальных стратегий обслуживания во всем диапазоне практически значимых размерностей группировки.

§ 3.4 посвящен оценке возможности синтеза стратегий обслуживания с помощью реализации нейросетевого подхода⁷. В п. 3.4.1 приводится описание искусственной нейронной сети (однослойного персептрона), способной осуществить синтез стратегий обслуживания.

В п. 3.4.2 описывается процедура формирования эталонных значений выходных сигналов, необходимых для осуществления процедуры обучения персептрона (п. 3.4.3).

В п. 3.4.4 дается оценка быстродействия компьютерной реализации искусственной нейронной сети, а в п. 3.4.5 на примере выполнения процедуры обучения персептрона для $n = 5$, $n = 6$ и $n = 7$ показывается принципиальная возможность использования модели однослойного

⁷ Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. – М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.

перцептрона для синтеза субоптимальных стратегий обслуживания в задаче (1).

В § 3.5 данные о значимых с точки зрения практического применения характеристиках алгоритмов $\mathcal{N}\mathcal{C}$, $\mathcal{S}\mathcal{A}$, $\mathcal{B}\cdot\mathcal{B}$ и $\mathcal{D}\mathcal{P}\text{-}d$ сведены в единую таблицу (табл. 4) и даны рекомендации по выбору того или иного алгоритма.

Таблица 4

Вычислительные характеристики алгоритмов

Алгоритм	Максимальная размерность группировки	Среднее относительное отклонение от оптимума (рекорда)	Максимальное относительное отклонение от оптимума (рекорда)	Процент совпадений с оптимумом (рекордом)
$\mathcal{N}\mathcal{C}$	40	[0.70; 6.44]	[8.11; 19.88]	[0; 78]
$\mathcal{D}\mathcal{P}\text{-}d$	30	[0.63; 5.51]	[8.89; 19.02]	[0; 85]
$\mathcal{S}\mathcal{A}$	40	[0.22; 4.70]	[11.13; 18.85]	[0; 96]

Как следует из данных табл. 4, обеспечиваемая алгоритмом $\mathcal{S}\mathcal{A}$ точность приближения оптимального решения выше, чем у алгоритмов $\mathcal{N}\mathcal{C}$ и $\mathcal{D}\mathcal{P}\text{-}d$.

Учитывая данное обстоятельство, а также результаты главы 1, можно заключить, что для модели $\mathcal{N}_{general}$ в зависимости от значения размерности группировки имеются следующие возможности применения алгоритмов синтеза оптимальных и субоптимальных стратегий обслуживания.

1. При $n \leq 15$ целесообразным является применение алгоритма $\mathcal{D}\mathcal{P}\text{-}\mathcal{B}\cdot\mathcal{B}$ синтеза *оптимальных* стратегий обслуживания.

2. При $16 \leq n \leq 40$ для синтеза *субоптимальных* стратегий обслуживания могут применяться либо алгоритм $\mathcal{S}\mathcal{A}$, либо алгоритм $\mathcal{B}\cdot\mathcal{B}$ в режиме ограничения максимальной продолжительности синтеза. Алгоритм $\mathcal{S}\mathcal{A}$ целесообразно использовать в тех случаях, когда синтез решения выполняется в сжатом временном регламенте, а качество приближения оптимума не имеет первостепенного значения – например, при построении карты устойчивости по структуре. Алгоритм же $\mathcal{B}\cdot\mathcal{B}$ следует применять в случаях, когда от получаемого решения требуется как можно большая его близость к оптимальному: согласно результатам вычислительных экспериментов никакой из эвристических алгоритмов $\mathcal{N}\mathcal{C}$, $\mathcal{D}\mathcal{P}\text{-}d$, $\mathcal{S}\mathcal{A}$ не позволяет получить «лучшего» решения, чем соответствующего рекорду метода ветвей и границ.

В четвертой главе (Частные модификации общей математической модели и специализированные алгоритмы оптимизации стратегий обслуживания) исследуются модификации общей математической модели $\mathcal{M}_{general}$, адекватно описывающие часто встречающиеся на практике производственные ситуации и позволяющие осуществлять синтез оптимальных стратегий обслуживания для группировок объектов существенно большей размерности.

§ 4.1 посвящен построению математической модели \mathcal{M}_{tree} и постановке экстремальной задачи двухрейсового обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов в рабочей зоне древовидной структуры (4.1.1–4.1.2). В п. 4.1.3 доказана NP-трудность задач данного класса, а для его подкласса \mathcal{K}_1^t , характеризующегося условием $t(i)=0$ ($i = \overline{1, n}$)), установлено существование псевдополиномиального решающего алгоритма.

Для решения экстремальной задачи в п. 4.1.4 выводятся решающие рекуррентные соотношения динамического программирования, а в п. 4.1.5 излагается алгоритм \mathcal{D}_{tree} синтеза оптимальной стратегии обслуживания и приводится оценка его вычислительной сложности.

Пункт 4.1.6 посвящен описанию условий и результатов вычислительного тестирования (по параметрам t_c и V) алгоритма \mathcal{D}_{tree} . Полученные результаты свидетельствуют о том, что алгоритм \mathcal{D}_{tree} практически полностью покрывает диапазон возможных в рамках модели \mathcal{M}_{tree} производственных ситуаций: при соблюдении 15-минутного регламента отработки алгоритм \mathcal{D}_{tree} способен осуществить синтез оптимальных стратегий обслуживания для группировок, включающих до 25 объектов (в то время как на практике максимальное количество ПДК в КГР не превышает 25–30).

На рис. 3 приведен пример стратегии двухрейсового обслуживания объектов в рабочей зоне древовидной структуры – номера объектов указаны в левых секторах, а порядковые номера их обслуживания обозначены курсивом в правых секторах графовой модели.

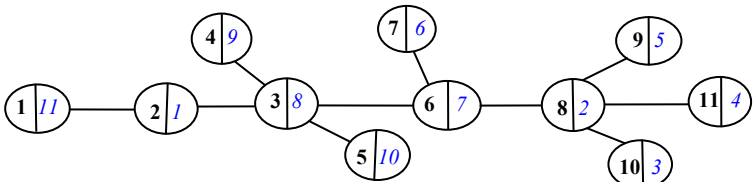


Рис.3. Пример стратегии двухрейсового обслуживания объектов в рабочей зоне древовидной структуры

Пп. 4.2.1–4.2.2 § 4.2 посвящены построению математической модели \mathcal{M}_{w+} и постановке экстремальной задачи двухрейсового обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов

в рабочей зоне типа w^+ (протяженная главная магистраль с простирающимися на относительно небольшие расстояния боковыми ответвлениями).

Решение сформулированной в § 4.2 экстремальной задачи сводится к решению последовательности задач, ранее исследованных в рамках моделей $\mathcal{M}_{general}$ и \mathcal{M}_{tree} : в п. 4.2.3 выводятся обобщающие рекуррентные соотношения динамического программирования, а в п. 4.2.4 излагается алгоритм \mathcal{DP}_{w^+} синтеза оптимальной стратегии обслуживания. Также в п. 4.2.4 описывается модификация алгоритма для ситуации, в которой распределение объектов главной магистрали по рейсам задается ЛППР, и далее требуется определить оптимальные последовательности обслуживания объектов, расположенных на боковых ответвлениях.

Пункт 4.2.5 посвящен описанию условий и результатов вычислительного тестирования (по параметрам t_c и V) алгоритма \mathcal{DP}_{w^+} . Полученные результаты свидетельствуют о том, что алгоритм \mathcal{DP}_{w^+} с запасом покрывает диапазон возможных в рамках модели \mathcal{M}_{w^+} производственных ситуаций: уже в пределах 8 мин алгоритм \mathcal{DP}_{w^+} способен осуществить синтез оптимальных стратегий обслуживания для группировок, включающих до 48 объектов.

На рис. 4 приведен пример стратегии двухрейсового обслуживания объектов в рабочей зоне типа w^+ – номера объектов указаны в левых секторах, а порядковые номера их обслуживания обозначены курсивом в правых секторах вершин графовой модели.

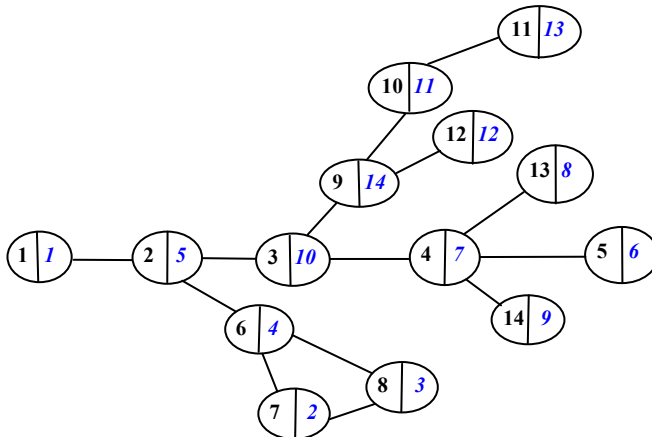


Рис.4. Пример стратегии двухрейсового обслуживания объектов в рабочей зоне типа w^+

В пятой главе (Интерактивный визуальный программный комплекс поддержки оперативного управления обслуживанием пространственно рассредоточенной группировки ПДК) описывается

разработанный программный комплекс [19–20] синтеза стратегий обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов, основу математического обеспечения которого составили модели $\mathcal{M}_{general}$, \mathcal{M}_{tree} , \mathcal{M}_{w+} и алгоритмы $\mathcal{DP}+\mathcal{B}_s\mathcal{B}$, $\mathcal{B}_s\mathcal{B}$, \mathcal{SA} , \mathcal{DP}_{tree} и \mathcal{DP}_{w+} .

Излагаются назначение и возможности комплекса, его программная архитектура, пользовательский интерфейс, приводятся копии рабочих экранов программы.

В заключении изложены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В приложении приведены документы о внедрении и использовании результатов диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

Основным результатом диссертационной работы является постановка и решение новой научной задачи, имеющей существенное значение для создания компьютерных систем поддержки оперативного планирования и диспетчеризации обслуживания пространственно рассредоточенных группировок стационарных объектов. Применение разработанных в диссертационной работе математических моделей, вычислительных алгоритмов и программного комплекса позволяет повысить эффективность использования крупномасштабных производственных комплексов (в частности, внутреннего водного транспорта за счет сокращения эксплуатационных расходов путем снижения уровня непроизводительных простоев).

При решении указанной задачи получены следующие научно-технические результаты.

1. Построены и исследованы базовые математические модели однопроцессорного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов, адекватно покрывающие представительное семейство оперативных условий функционирования ряда крупномасштабных производственных комплексов.

2. Сформулированы экстремальные задачи синтеза оптимальных стратегий для математических моделей однопроцессорного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов. Доказана NP-трудность этих задач.

3. Разработаны алгоритмы синтеза оптимальных и субоптимальных стратегий однопроцессорного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки объектов, обладающие достаточными для решения практических задач значениями скоростных и объемных характеристик.

4. Создан программный комплекс для решения задач оптимизации оперативного планирования однопроцессорного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов.

По исследованной проблеме автором опубликовано 20 работ [1-20], в которых приведены основные научные результаты диссертации.

1. Шлюгаев, А.Ю. Алгоритмы синтеза оптимального обслуживания группы пространственно рассредоточенных объектов mobile-процессором / А.Ю. Шлюгаев // XI нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: Материалы докладов. Н.Новгород, 12–16 февр. 2006 г. – Н.Новгород: Изд-во Гладкова О.В., 2006. – С. 34.

2. Шлюгаев, А.Ю. Модели обслуживания группы пространственно рассредоточенных объектов mobile-процессором и проблема синтеза оптимальных расписаний при наличии двух оценочных критериев / А.Ю. Шлюгаев // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2006)». Н.Новгород, 21 апр. 2006 г. – Н.Новгород: НГТУ, 2006. – С. 165–166.

3. Федосенко, Ю.С. Идея и программная реализация эвристического алгоритма бикритериального синтеза расписаний обслуживания mobile-процессором пространственно рассредоточенной группы объектов / Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Технологии Microsoft в теории и практике программирования. Материалы конференции. Н.Новгород, 21-22 мар. 2006 г. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006. – С. 318–321.

4. Шлюгаев, А.Ю. Реализация синтеза расписаний обслуживания группы пространственно рассредоточенных объектов mobile-процессором методом динамического программирования / А.Ю. Шлюгаев // XI нижегородская сессия молодых ученых. Математические науки: Материалы докладов. Н.Новгород, 22-25 мая 2006 г. – Н.Новгород: Изд-во Гладкова О.В., 2006. – С. 26.

5. Федосенко, Ю.С. Общая задача однопроцессорного обслуживания пространственно рассредоточенной группы стационарных объектов / Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Математическое моделирование и оптимальное управление: Вестник ННГУ (индекс – 88053). – 2007. – №3. – С. 119–123.

6. Шлюгаев, А.Ю. Оптимизация обслуживания пространственно рассредоточенной группы стационарных объектов mobile-процессором в условиях концепции d-расписаний / А.Ю. Шлюгаев // Труды НГТУ. Системы обработки информации и управления. – Н.Новгород: НГТУ. – 2007. – Т. 65. – Вып. 14. – С. 42–50.

7. Коган, Д.И. Математическая модель и алгоритм синтеза субоптимальных расписаний однопроцессорного обслуживания пространственно рассредоточенной группы стационарных объектов / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Труды VI Международной конференции SICPRO'07. М., 29 янв. – 1 февр. 2007 г. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2007. – С. 1026–1038.

8. Шлюгаев, А.Ю. Оптимизация процесса снабжения топливом плавучих добывающих комплексов в крупномасштабном районе с существенно разветвленной русловой топологией / А.Ю. Шлюгаев // XII нижегородская сессия

молодых ученых. Технические науки: Материалы докладов. Н.Новгород, 26 февр. – 2 мар. 2007 г. – Н.Новгород: Изд-во Гладкова О.В., 2007. – С. 12–13.

9. Федосенко, Ю.С. Комбинированный алгоритм синтеза расписаний двухрейсового обслуживания группы стационарных объектов в древовидной рабочей зоне / Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Технологии Microsoft в теории и практике программирования. Материалы конференции. Н.Новгород, 3-4 апр. 2007 г. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2007. – С. 309–313.

10. Коган, Д.И. Задача одностадийного обслуживания добывающих комплексов в крупномасштабной акватории / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Труды V Московской международной конференции по исследованию операций (ORM2007). М., 10–14 апр. 2007 г. – М.: МАКС Пресс, 2007. – С. 60–62.

11. Шлюгаев, А.Ю. Модель двухрейсового обслуживания mobile-процессором группы стационарных объектов в древовидной рабочей зоне с учетом индивидуальных предпочтений / А.Ю. Шлюгаев // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2007)». Н.Новгород, 20 апр. 2007 г. – Н.Новгород: НГТУ, 2007. – С. 222.

12. Федосенко, Ю.С. Модели и алгоритмы оптимизации стратегий снабжения топливом плавучих добывающих комплексов в крупномасштабных районах со сложной русловой топологией / Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // 9-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2007 / ICEF»: генеральные доклады, тезисы докладов. Н. Новгород, 15–19 мая 2007 г.

13. Федосенко, Ю.С. Обобщение задачи коммивояжера для модели одностадийного обслуживания пространственно рассредоточенной группировки стационарных объектов / Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Проблемы теоретической кибернетики. Тезисы докладов XV международной конференции (Казань, 2–7 июня 2008 г.). Под редакцией Ю.И. Журавлева. – Казань: Отечество, 2008. – С.116–117.

14. Shlyugaev, A.Yu. Mathematical models and algorithms of synthesizing servicing schedules of a group of spatially distributed fixed objects by a mobile processor / A.Yu.Shlyugaev // EURO 2007 – 22nd European Conference on Operational Research, Prague, Czech republic, July 8–11, 2007. Book of abstracts, p. 217.

15. Федосенко, Ю.С. Нейросетевая методика синтеза расписаний обслуживания группировки стационарных объектов / Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Нейрокомпьютеры: разработка и применение (индекс – 79241). – М.: Радиотехника. – 2007. – №11. – С. 46–53.

16. Шлюгаев А.Ю. Модели и алгоритмы синтеза стратегий одностадийного обслуживания группировки стационарных объектов / А.Ю. Шлюгаев // Технологии Microsoft в теории и практике программирования. Материалы конференции. Н.Новгород, 19–20 мар. 2008 г. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2008. – С. 359–361.

17. Шлюгаев, А.Ю. Интерактивный визуальный программный комплекс поддержки оперативного управления снабжением топливом группировки плавучих добывающих комплексов / А.Ю. Шлюгаев // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2008)». Н.Новгород, 18 апр. 2008 г. – Н.Новгород: НГТУ, 2008. – С. 49.

18. Федосенко, Ю.С. О рациональной архитектуре интеллектуальной программной системы оперативного управления снабжением топливом группировки плавучих добывающих комплексов / Ю.С. Федосенко, А.Ю. Шлюгаев // Интеллектуальные системы: Труды 8-го международного симпозиума. – М.: РУСАКИ, 2008. – С. 576–579.

19. Шлюгаев, А.Ю. Интерактивный визуальный программный комплекс поддержки оперативного управления снабжением топливом группировки плавучих добывающих комплексов / А.Ю. Шлюгаев // Инновации в науке и образовании / Телеграф отраслевого фонда алгоритмов и программ. – ФГНУ «Государственный координационный центр информационных технологий». – 2008. – Февраль. – №2(37).

20. Свидетельство № 2008611757 РФ. Интерактивный визуальный программный комплекс поддержки оперативного управления снабжением топливом группировки плавучих добывающих комплексов / А.Ю. Шлюгаев, заявитель и правообладатель. – Заявл. 21.02.08; зарег. 02.04.08. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ, Реестр программ для ЭВМ.

Формат бумаги 60x84 ¹/₁₆. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0.
Заказ . Тираж 100.

Отпечатано в типографии
издательско-полиграфического комплекса ФГОУ ВПО ВГАВТ

603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 а