

*На правах рукописи*

**ВЛАСОВ ВАЛЕНТИН СЕРГЕЕВИЧ**

**УПОРЯДОЧЕНИЕ РАБОТ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В  
КАНОНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ «КОНВЕЙЕР-СЕТЬ»**

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ  
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2009

Работа выполнена на кафедре информатики и автоматизации научных исследований Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского».

Научный руководитель: доктор технических наук  
профессор  
Прилуцкий Михаил Хаимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
профессор  
Федосенко Юрий Семенович

кандидат физико-математических наук  
доцент  
Шапошников Дмитрий Евгеньевич

Ведущая организация: Институт проблем управления РАН (г. Москва)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.166.13 при Нижегородском Государственном Университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук  
доцент

Савельев Владимир Петрович

## **Актуальность темы исследования**

Одной из наиболее важных проблем, возникающих в различных областях человеческой деятельности (технической, экономической, организационной и др.), является проблема совершенствования управления. Очень часто эффективное управление состоит в использовании ресурсов оптимальным образом.

Экстремальные задачи распределения ресурсов были сформулированы в 50-х годах. Начались интенсивные и систематические исследования по построению и анализу математических моделей календарного планирования. Появились новые методы решения задач распределения ресурсов, которые легли в основу сетевого планирования.

Появилось понятие «проект», обозначающее комплекс взаимосвязанных работ, для выполнения которых выделены ресурсы и установлены сроки. Со временем масштабы проектов увеличивались, и стало невозможно «вручную» согласовывать огромное число операций. Стали развиваться математические методы решения задач распределения ресурсов.

Развитием этой научной области занимались такие ученые как Бурдюк В.Я., Бурков В.Н., Гордон В.С., Кульба В.В., Мирносецкий Н.Б., Михалевич В.С., Норенков И.П., Подчасова Т.П., Танаев В.С., Шкурба В.В., Шор Н.З. и многие другие. Из зарубежных ученых это Гиффлер Б., Джонсон Б., Конвой Р., Максвелл У., Томпсон Ж. и другие. Следует отметить школу нижегородского университета и ученых Батищева Д.И., Прилуцкого М.Х., Когана Д.И., Федосенко Ю.С., которые рассматривали подобные проблемы.

Задачи планирования и управления изготовлением сложных изделий включают в себя несколько стадий, каждую из которых можно отнести либо к классу последовательного выполнения работ (конвейерные технологии), либо к классу распределения ресурсов в сетевых структурах. В результате их анализа, в диссертационной работе представлена модель систем типа «конвейер-сеть», включающая в себя последовательность данных технологий.

Выделение данного класса систем позволило не только более естественно описывать в рамках поставленной модели многие инженерные и технические задачи, но и существенно сократило время их решения, используемые аппаратные ресурсы, а также оптимизировало поиск расписаний.

Для решения задач, относящихся к системам типа «конвейер-сеть», выделен метод, соединяющий в себе подход, связанный как с упрощением исходной задачи, а, следовательно, со снижением ее математической сложности, так и с применением различных комбинаций конфигурируемых эвристических алгоритмов. Ключевая идея подобного подхода состоит в том, что размерность задачи сокращается путем ее разбиения, для полученных таким образом задач меньшей размерности производится поиск решения, после чего происходит оценка решения исходной задачи объединением полученных решений.

Другим способом сокращения вычислительной сложности решающих алгоритмов служит введение элементов стохастичности. Данные методы не гарантируют обнаружения оптимального решения. Однако практический интерес к ним не ослабевает, а наоборот, усиливается. Объяснить это можно тем обстоятельством, что эти методы позволяют исследовать и находить приемлемые решения таких задач, решение которых при помощи традиционных методов оказывается затруднительным, а в некоторых случаях и просто невозможным. Кроме того, полученное решение задачи одним алгоритмом может быть использовано как начальное решение для другого алгоритма, что позволяет комбинировать алгоритмы различным образом и настраивать их для поиска решения конкретной задачи. Использование эвристических алгоритмов для определения начальных решений для точных алгоритмов позволило находить оптимальные решения для задач небольшой размерности, а для большеразмерных систем принимать лучшее из найденных значений («рекорд») за эвристическую оценку искомого расписания.

### **Цели и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является построение и исследование математических моделей распределения ресурсов и упорядочения работ в канонических системах типа «конвейер-сеть», постановка оптимизационных задач планирования и оперативного управления производственными системами, разработка алгоритмов решения этих задач и создание на их основе диалоговой программной системы.

В соответствии с этой целью в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- проведена классификация моделей распределения ресурсов и упорядочения работ;
- выделен класс задач, относящихся к каноническим системам типа «конвейер-сеть»;
- построены математические модели и поставлены оптимизационные задачи распределения ресурсов и упорядочения работ, для которых проведено исследование и показана их NP-трудность;
- разработаны методы решения задач рассматриваемого класса;
- создана диалоговая система решения задач упорядочения и распределения ресурсов в канонических системах типа «конвейер-сеть», которая используется в практике планирования и оперативного управления процессом изготовления изделий микроэлектронного производства, изделий инструментального производства и изделий машиностроения в опытном производстве.

### **Научная новизна**

1. Выделен новый класс канонических систем «конвейер-сеть», описывающий многостадийные производственные процессы – чередование стадий конвейерных и сетевых технологий, где конвейерные технологии связаны с упорядочиванием работ, а сетевые – с распределением ресурсов.

2. Построены математические модели канонических систем с конвейерными и сетевыми технологиями. Проведено их исследование.

3. В рамках построенных математических моделей поставлены оптимизационные задачи упорядочения работ и распределения ресурсов по критерию быстродействия.

4. Предложены алгоритмы решения поставленных задач, в основу которых заложены основные вычислительные процедуры метода ветвей и границ с использованием комбинирования точных и эвристических алгоритмов для получения оценок эффективности полученных решений.

5. Создана диалоговая программная система решения задач, относящихся к классу задач «конвейер-сеть».

### **Теоретическая и практическая ценность диссертационной работы**

Практическая ценность диссертационной работы состоит в разработке и реализации диалоговой программной системы решения задач упорядочения работ и распределения ресурсов в канонических системах «конвейер-сеть», которая внедрена в постоянную эксплуатацию при планировании и оперативном управлении процессом производства изделий микроэлектроники, а также диалоговой программной системы, внедренной в постоянную эксплуатацию в составе автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления инструментальным производством в ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е.Седакова». С помощью диалоговой системы решены задачи планирования и оперативного управления процессом изготовления изделий машиностроения для опытного производства в ФГУП «ФНПЦ ОКБМ им. И.И. Африкантова».

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского на факультете вычислительной математики и кибернетики при преподавании курса «Теория систем и системный анализ».

### **Апробация результатов**

Научные результаты диссертационной работы изложены в 14 работах: в 4 статьях в научно-технических журналах, 2 из которых рекомендованы ВАК РФ, 10 тезисов докладов с выступлений на научно-технических конференциях.

Результаты докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2005 (Н.Новгород, 2005г.), Международных научно-технических конференциях «Информационные системы и технологии» ИСТ-2006, ИСТ-2007, ИСТ-2009 (Н.Новгород, 2006г., 2007г., 2009г.), конференциях «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (Н.Новгород, 2006, 2007, 2008, 2009), XI Нижегородской сессии молодых ученых (Н.Новгород, 2006г.), Международной конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» (Н. Новгород 2007г.), Отраслевой конференции Росатом «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (Н. Новгород, 2007), на семинарах кафедры информатики и автоматизации научных исследований факультета ВМК ННГУ.

Кроме того, результаты диссертационной работы прошли апробацию при выполнении хоздоговорных работ между Нижегородским Государственным Университетом им. Н.И. Лобачевского и ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», в которых автор был исполнителем-разработчиком алгоритмов и автором программных реализаций функциональных блоков систем, а также при выполнении госбюджетной темы «Математическое моделирование и создание новых методов анализа динамических систем и систем автоматизации» в подтеме «Создание алгоритмов решения оптимизационных задач распределения и упорядочения» (2007-2009 гг.).

### **Структура и объем диссертации.**

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание изложено на 125 страницах машинописного текста и иллюстрировано 12 рисунками. Список литературы содержит 107 наименований.

### **Содержание диссертации**

Во введении отражена актуальность задач распределения ресурсов и упорядочения работ. Отражены цели и задачи исследования, научная новизна работы.

В **главе 1** рассматриваются классические задачи распределения ресурсов и упорядочения работ.

В **разделе 1.1** определяется место задач распределения ресурсов в классе задач математического программирования. Приводятся понятия общей задачи математического программирования и задач дискретного программирования, как подкласса задач математического программирования.

Дана классификация задач дискретного программирования и рассматриваются задачи теории расписаний как подкласс задач дискретного программирования. Задачи теории расписаний традиционно классифицируются на задачи упорядочивания, согласования и распределения.

В **разделе 1.2** производится классификация задач распределения и упорядочения, рассматриваются основные понятия из области сетевого планирования. Классификация задач проведена по следующим критериям: степень информированности при решении задачи, структура объекта, характер выполнения работ, вид сетевой модели. В параграфе также рассмотрены такие хорошо известные методы решения задач на сетевых графиках как метод критического пути (Critical Path Method - CPM), а также метод типа метода оценки и пересмотра программ (Program Evaluation and Review Technique - PERT).

Задача распределения ресурсов в сетевых канонических структурах содержательно сформулирована следующим образом. Необходимо осуществить совокупность некоторых взаимозависимых деятельности (работ). Каждая деятельность характеризуется: множеством деятельности, непосредственно ей предшествующих, значениями длительностей, значениями интенсивностей потребления ресурсов и ресурсоемкостью по каждому ресурсу.

При этом

- активизация деятельности возможна не раньше такта времени после завершения выполнения всех деятельности, непосредственно ей предшествующих (свойство *каноничности*),



- продолжительность осуществления деятельности должна принадлежать заданному интервалу длительностей,
- деятельности должны потреблять ресурсы с интенсивностями, принадлежащими заданным интервалам,
- каждый используемый деятельностью ресурс потребляется в количестве, заданном ресурсоемкостью,
- деятельности могут объединяться в группы (групповые деятельности), которые должны выполняться последовательно и без перерывов,
- для деятельности может быть задано время пролеживания - минимально возможный интервал времени до начала выполнения следующей деятельности, и межоперационное время - максимально возможный интервал времени до начала следующей деятельности.

Перечисленные требования образуют группу условий технологического типа.

Для ряда деятельностей вводятся директивные сроки – такты времени, к которым необходимо завершить их выполнение. Требования по директивным срокам образуют группу условий организационного характера.

Для каждого ресурса его суммарное потребление в каждый такт не должно превышать значения, характеризующего количество, в котором он доступен в данном такте. Данная группа требований носит ресурсный характер.

Задача распределения ресурсов в сетевых канонических структурах заключается в определении способа осуществления всей совокупности деятельностей, удовлетворяющего всем группам требований. Под способом осуществления деятельностей мы будем понимать выбор следующих параметров: моментов активизации деятельностей, ресурсов, интенсивностей потребления выбранных ресурсов.

В разделе 1.3 с использованием терминологии работа-станок введено определение систем типа «конвейер-сеть». Основным свойством таких систем является то, что взаимозависимость выполнения работ для любого изделия

(технология изготовления изделий) обладает следующей спецификой. Весь технологический процесс можно разбить на несколько стадий, каждая из которых относится либо к классу «конвейерных», либо к классу «сетевых» технологий. Конвейерные технологии предполагают, что работы каждого изделия последовательно выполняются на станках в определенном, заранее заданном порядке. Формализация подобных технологий связана с задачами упорядочения работ. В качестве конвейерной системы может рассматриваться любая совокупность станков, которые выполняют все операции в одном и том же порядке. Для такой системы вовсе не обязательно, чтобы каждая деталь состояла из операций, выполняемых на каждом станке, или чтобы все операции начинались и заканчивались определенными станками. Существенно лишь, что все перемещения операции, связанные с окончанием ее выполнения на одном станке и началом выполнения на другом, должны происходить в одном направлении. Сетевые технологии являются более общими. Формально они задаются взвешенным ориентированным графом без петель и контуров. Такие технологические процессы связаны с распределением ресурсов. Если для конвейерных технологий каждой работе может непосредственно предшествовать не более одной работы, то для сетевой технологии таких непосредственно предшествующих работ может быть несколько. Рассмотрены задачи планирования и оперативного управления процессом производства изделий микроэлектроники (производство БИС и ГИС), изделий инструментального производства (изготовление пресс-форм) и опытного производства (производство изделий машиностроения), которые могут быть формализованы в рамках канонических систем «конвейер-сеть».

**Глава 2** посвящена рассмотрению математических моделей упорядочения работ и распределения ресурсов в сетевых канонических системах.

В **разделе 2.1** построена общая математическая модель сетевой канонической системы. Исходными параметрами математической модели являются  $T = \{0, 1, \dots, T_0\}$  – множество тактов планирования,  $J$  – множество всех

работ (деятельностей), а  $K(j)$  – множество работ, непосредственно предшествующих работе с номером  $j$ ,  $K(j) \subset J, j \in J$ .  $I$  – множество различных ресурсов. Через  $n_i$  обозначим срок годности ресурса  $i$ ,  $i \in I, n_i \in N$ . Тогда  $I^H = \{i | n_i = 1, i \in I\}$  – множество нескладируемых ресурсов,  $I^C = \{i | n_i > T_0, i \in I\}$  – множество складируемых ресурсов, а  $I^{qc} = \{i | 2 \leq n_i \leq T_0, i \in I\}$  – множество частично-складируемых ресурсов.

Пусть  $V = \|v_{it}\|$  – матрица поступлений ресурсов в систему, где  $v_{it}$  обозначает количество ресурса с номером  $i$ , которое поступит в систему в такт  $t$ ,  $i \in I, t \in T$ .  $R = \|r_{ij}\|$  – матрица ресурсоемкостей, где  $r_{ij}$  обозначает количество ресурса с номером  $i$ , которое требуется для выполнения работы с номером  $j$ ,  $i \in I, j \in J$ .

Обозначим через  $m_{ij}, M_{ij}$  – минимальную и максимальную интенсивности потребления работой с номером  $j$  ресурса с номера  $i$ ,  $0 \leq m_{ij} \leq M < \infty, i \in I, j \in J$ , а через  $t_j^-, t_j^+$  – минимальную и максимальную длительность выполнения работы  $j$ ,  $j \in J$ .

Пусть  $G(j_s)$  – множество групповых работ, начинающихся с работы  $j_s$ ,  $G(j_s) = \{j_s, j_k, \dots, j_t\}, j_s \in J$ . Введем множество работ, являющихся начальными для соответствующих им групп –  $G = \{\lambda_1, \dots, \lambda_k\}, \lambda_1, \dots, \lambda_k \in J$ . Обозначим через  $t_j^{min}$  – время пролеживания  $j$ -й работы,  $j \in J^{min}$ , где  $J^{min}$  – множество работ, для которых определено время пролеживания;  $t_j^{max}$  – межоперационное время  $j$ -й работы,  $j \in J^{max}$ , где  $J^{max}$  – множество работ, для которых определено межоперационное время.

Через  $J^D$  обозначим множество работ, имеющих директивные сроки окончания,  $J^D \subseteq J$ ,  $d_j$  – директивный срок окончания выполнения работы с номером  $j$ ,  $j \in J^D$

В качестве варьируемых параметров модели выступают вектора  $X = (x_1, \dots, x_{|J|})$  – вектор времен начала выполнения работ,  $Y = (y_1, \dots, y_{|J|})$  – вектор

времен окончания выполнения работ, а также  $Z = \|z_{ijt}\|$  – матрица интенсивностей, где  $z_{ijt}$  – интенсивность потребления ресурса с номером  $i$  работой с номером  $j$  в такт времени  $t$ ,  $i \in I, j \in J, t \in T$ .

### Ограничения математической модели

*Естественные ограничения на переменные:*

$$x_j \in T, y_j \in T, z_{ijt} \geq 0, i \in I, j \in J, t \in T.$$

*Ограничения каноничности модели:*

$$x_j \geq y_l, l \in K(j), j \in J.$$

*Ограничения на интенсивность потребления ресурсов:*

$$\begin{cases} m_{ij} \leq z_{ijt} \leq M_{ij}, \text{ если } t \in [x_j, y_j] \\ z_{ijt} = 0, \text{ если } t \notin [x_j, y_j]; \end{cases}, i \in I, j \in J.$$

*Ограничения на длительности выполнения работ:*

$$t_j^- \leq y_j - x_j \leq t_j^+, j \in J.$$

*Ограничения на использование ресурсов:*

$$\sum_{t \in T} z_{ijt} = r_{ij}, i \in I, j \in J.$$

*Ограничения для групповых работ:*

$$x_j = y_k, k \in K(j), k, j \in G(I_s), I_s \in G.$$

*Ограничения по времени пролеживания:*

$$x_j \geq y_k + t_k^{\min}, k \in (K(j) \cap J^{\min}), j \in J.$$

*Ограничения по межоперационному времени:*

$$y_k \leq x_j \leq y_k + t_k^{\max}, k \in (K(j) \cap J^{\max}), j \in J.$$

*Ограничения для директивных сроков выполнения работ:*

$$y_j \leq d_j, j \in J^D.$$

*Ресурсные ограничения:*

Обозначим через

$$P_{it} = v_{it} - \sum_{j \in J} z_{ijt} - \max(0, P_{it'}),$$

где  $\max(0, P_{it})$  - потери  $i$ -го ресурса, поступившего в систему в такт  $t$ , из-за истечения срока его годности,  $i \in I, t \in T$ . Здесь  $\sum_{t=1}^0 \max(0, P_{it}) = 0$ . Тогда

$$W_{it} = v_{it} - \sum_{j \in J} z_{ijt} - \sum_{t'=1}^{t-1} \max(0, P_{it'}) - \text{количество } i\text{-го ресурса, которое может быть}$$

использовано в такт  $t$  для выполнения работ,  $i \in I, t \in T$ . С учетом введенных обозначений, ресурсные ограничения примут вид:

$$z_{ijt} \leq W_{it}, i \in I, t \in T$$

Проводится исследование построенной математической модели. Показано, что проблема существования допустимого решения для общей математической модели является NP-полной.

**Раздел 2.2.** посвящен задаче упорядочения работ с конвейерными технологиями. Показано, что задача упорядочения работ может быть поставлена в рамках общей математической модели. Приводится взаимнооднозначное соответствие между допустимыми решениями построенной системы ограничений и множеством перестановок из  $n$ -чисел.

**В разделе 2.3.** приводится математическая модель распределения ресурсов для систем с сетевыми технологиями. Приведены основные отличия от классической модели. Проведено исследование построенной модели и показано, что проблема существования относится к классу NP-полных проблем.

**В главе 3** рассматриваются различные постановки оптимизационных задач распределения ресурсов и упорядочения работ, получаемые посредством «комбинирования» различных частных случаев общей модели с различными функциями штрафа. Приводятся алгоритмы решения задач распределения ресурсов и упорядочения работ. Для решения поставленных задач разработан декомпозиционный метод, в основу которого заложены основные процедуры метода ветвей и границ. Для реализации процедуры оценок разработаны стохастические и детерминированные алгоритмы, а также схема их комбинирования.

**Раздел 3.1** посвящен рассмотрению различных критериев оптимальности.

Смысл каждого критерия – штрафные санкции, которые накладываются на систему за нарушение тех или иных требований. Например, функции штрафа за невыполнение требований ресурсного характера имеют вид

$$g_{it}(\sum_{j \in J} z_{ijt}, v_{it}) = \begin{cases} \gamma_{it} \frac{v_{it} - \sum_{j \in J} z_{ijt}}{v_{it}} * 100, \text{ если } v_{it} \geq \sum_{j \in J} z_{ijt} \\ \delta_{it} \frac{\sum_{j \in J} z_{ijt} - v_{it}}{v_{it}} * 100, \text{ если } v_{it} < \sum_{j \in J} z_{ijt} \end{cases}, i \in I, t \in T,$$

Здесь  $\gamma_{it}$  – параметр, определяющий штрафные санкции, связанные с неиспользованием 1% ресурса  $i$  в такт  $t$ , а  $\delta_{it}$  – параметр, определяющий штрафные санкции, связанные с недостатком 1% ресурса  $i$  в такт  $t$ ,  $i \in I, t \in T$ .

Аналогично вводятся критерии оптимальности, связанные с нарушением требований организационного характера:

$$f_j(y_j, D_j) = \begin{cases} \alpha_j * (y_j - D_j), \text{ если } y_j \geq D_j \\ 0, \text{ если } y_j < D_j \end{cases}, j \in J^D.$$

Здесь  $\alpha_j$  – коэффициент штрафа за «отставание» выполнения работы  $j$  от ее директивного срока  $D_j$  на 1% от величины,  $j \in J^D$ .

**Раздел 3.2.** посвящен описанию основных процедур метода ветвей и границ для решения задачи построения расписания в канонических системах типа «конвейер-сеть». Приводится описание алгоритмов определения граничных значений метода для конвейерных и сетевых технологий. Показано, что, генерируя по некоторым правилам перестановки, можно находить значения соответствующего им критерия и в качестве верхней оценки выбирать минимальное значение.

**Раздел 3.3.** посвящен стохастическим и детерминированным алгоритмам решения задач упорядочения работ и распределения ресурсов. Приводится описание алгоритмов-построителей расписания, зависящих от перестановки  $\rho$ , и предназначенных для получения допустимой перестановки, удовлетворяющей ограничениям конкретной модели. Описаны стохастические

алгоритмы для построения перестановок в канонических системах «конвейер-сеть». Приводится описание адаптированных для работы с построенными моделями алгоритмов отжига, генетического алгоритма и роевых алгоритмов. В результате работы всех алгоритмов генерируются перестановки. Так, алгоритм отжига основывается на имитации физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества из жидкого состояния в твёрдое, в том числе при отжиге металлов. В основе роевого алгоритма используется аналогия между решением оптимизационной задачи и моделированием поведения колонии «муравьев». Колония рассматривается как многоагентная система, в которой каждый агент (муравей) функционирует по простым правилам, и при этом поведение всей системы (колонии муравьев) приводит к приемлемым результатам. Это качество многоагентной системы следует из так называемой «роевой» логики. В основе эволюционно-генетических алгоритмов заложена идея наследственности в биологических популяциях

Рассматриваются детерминированные алгоритмы. Предлагаются фронтальный алгоритм и алгоритм, основанный на решении задачи о назначениях. Фронтальный алгоритм основан на построении «фронта работ» - множества работ, которые могут быть реализованы в текущий такт работы системы. На множестве работ из фронта работ задается полный (линейный) порядок, используя резервы времени работ, полученные после преобразования исходной сетевой модели в сетевой график. В задаче о назначениях устанавливается взаимнооднозначное соответствие между бистохастическими булевыми матрицами, определяющими решения задачи о назначениях, и множеством перестановок, определяющих расписания выполнения работ. При этом показано, что связать значения критерия задачи о назначениях со значениями критерия системы «конвейер-сеть» можно, например, используя в качестве матрицы, определяющей коэффициенты критерия задачи о назначениях матрицу, найденную в результате работы роевого алгоритма.

Поскольку большинство из описанных алгоритмов на входе может использовать перестановку (или набор перестановок) в качестве исходных

данных, а результатом работы алгоритма также является перестановка, то для наиболее эффективного решения задачи в канонических системах «конвейер-сеть» при большом числе исходных параметров предлагается последовательное использование алгоритмов, когда «лучшая» перестановка (или набор “лучших” перестановок), полученная одним из алгоритмов, используется как начальная для другого алгоритма.

**В главе 4** рассматриваются программные средства решения задач распределения ресурсов и упорядочения работ в канонических системах «конвейер-сеть» с помощью разработанных алгоритмов. Показана эффективность предложенных алгоритмов на тестовых примерах.

Для конвейерной задачи серия экспериментов проводилась на тестовых примерах, для которых заранее известны найденные оптимальные решения. Библиотека тестовых задач поддерживается профессором Лондонского Университета Brunel по исследованию операций на сайте <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>.

Эксперименты проводились сериями из 5 тестовых задач в каждой по 20, 50, 100, 200 и 500 операций. Время проведения каждого эксперимента составляло 10 минут. Эксперименты проводились на ПЭВМ со следующей конфигурацией: процессор AMD Athlon(tm) 64 X2 Dual Core processor 6000+ 3.01 ГГц, 2 Гб оперативной памяти. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Число работ	Число станков	$F_{\text{опт}}$	$F_{\text{найд}}$	$w_{\text{ср}}$
20	5	1278	1278	≈0,001
20	5	1359	1359	
20	5	1293	1297	
20	5	1236	1236	
20	5	1195	1195	
50	5	2724	2729	≈0,005
50	5	2834	2859	
50	5	2621	2625	
50	5	2751	2757	



50	5	2863	2886	
100	5	5493	5495	≈0,004
100	5	5268	5292	
100	5	5175	5212	
100	5	5014	5023	
100	5	5250	5290	
200	10	10868	11316	≈0,046
200	10	10494	11095	
200	10	10922	11373	
200	10	10889	11331	
200	10	10524	11216	
500	20	26189	28228	≈0,08
500	20	26629	28780	
500	20	26458	28390	
500	20	26549	28412	
500	20	26404	29041	

Таблица 1

В таблице 1 приведены средние относительные отклонения значений критерия задачи на найденном решении ( $F_{\text{найд}}$ ) от известных значений оценок ( $F_{\text{опт}}$ ). Проведенный вычислительный эксперимент показал высокую степень качества разработанных алгоритмов оптимизации, с отклонением значения критериев от оптимальных не более чем на 8% для исследуемого класса задач.

Для канонических систем типа «конвейер-сеть» были сгенерированы тестовые задачи, состоящие из последовательности конвейерных и сетевых технологий. Эксперименты проводились для серии из 5 задач по 20, 50, 100, 500 и 1000 операций. При этом каждая из задач решалась двумя способами:

- Полное решение исходной задачи как сетевой канонической структуры;
- Декомпозиция задачи на классы сетевых и конвейерных технологий.

В таблице 2 приведены результаты эксперимента. Показано решение, полученное после декомпозиции задачи ( $F_{\text{к-с}}$ ), решение задачи как сетевой структуры ( $F_{\text{кан}}$ ) и среднее отклонение полученных решений ( $w_{\text{ср}}$ ).

Число работ	Число станков	$F_{\text{к-с}}$	$F_{\text{кан}}$	$w_{\text{ср}}$
-------------	---------------	------------------	------------------	-----------------

20	10	837	837	0
20	10	938	938	
20	10	954	954	
20	10	911	911	
20	10	894	894	
50	20	1916	1935	≈0,012
50	20	2012	2039	
50	20	1954	1978	
50	20	1987	1987	
50	20	1953	1989	
100	20	4816	4893	≈0,02
100	20	4765	4802	
100	20	4824	4916	
100	20	4911	5023	
100	20	4832	4954	
500	30	21349	22064	≈0,042
500	30	20931	21853	
500	30	21096	21985	
500	30	21716	22971	
500	30	21533	22847	
1000	40	43528	45832	≈0,049
1000	40	43719	45374	
1000	40	43101	45630	
1000	40	44235	46012	
1000	40	43562	45961	

Таблица 2

Результаты эксперимента подтверждают правомерность применения декомпозиционного подхода в задачах распределения ресурсов в сетевых канонических системах.

Приводится общая схема решения задач в канонических системах типа «конвейер-сеть» и описаны конкретные примеры решения производственных задач управления процессом изготовления микросистемных изделий (производство БИС и ГИС), изделий инструментального производства (изготовление пресс-форм), продукции опытного производства (изделия машиностроения).

**В приложении** содержатся документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

## **Основные результаты** диссертационной работы.

В работе рассмотрены задачи распределения ресурсов и упорядочения работ. Проведена классификация задач упорядочения работ и распределения ресурсов. Выделен класс задач, относящихся к каноническим системам типа «конвейер-сеть», представляющий многостадийные производственные процессы, связанные с чередованием конвейерных и сетевых технологий.

Построены математические модели канонических систем типа «конвейер-сеть», в рамках которых поставлены оптимизационные задачи нахождения оптимального по быстродействию расписания. Проведено исследование моделей распределения ресурсов и упорядочения работ и показано, что проблема существования допустимого решения данного класса задач является NP-полной.

Для решения поставленных задач предложен алгоритм, в основу которого заложены процедуры метода ветвей и границ с использованием комбинирования детерминированных и стохастических алгоритмов для получения граничных оценок. Программная реализация предложенных в работе алгоритмов показала их высокую степень качества на ряде тестовых примеров с известными оптимальными решениями. Предложен общий метод решения большеразмерных задач в системах типа «конвейер-сеть» на основе многоуровневого алгоритма декомпозиции. Проведена серия экспериментов, которая демонстрирует производительность предложенного подхода по сравнению с общим методом поиска решения в сетевых структурах.

Теоретические результаты диссертационной работы легли в основу диалоговых программных систем, внедренных в постоянную эксплуатацию при планировании и оперативном управлении процессом производства изделий микроэлектроники и диалоговой программной системы, внедренной в постоянную эксплуатацию в составе автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления инструментальным производством в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е.Седакова», а также апробированных при

планировании процесса изготовления изделий машиностроения в ФГУП  
«ФНПЦ ОКБМ им. И.И. Африкантова».

## Публикации.

*Статьи в журналах, периодических изданиях,  
включенных в список ВАК РФ*

1. Прилуцкий М.Х. Метод ветвей и границ с эвристическими оценками для конвейерной задачи теории расписаний. / Прилуцкий М.Х., Власов В.С. //Вестник Нижегородского государственного университета. Математическое моделирование и оптимальное управление. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2008. Вып. 3 стр. 147-153.
2. Прилуцкий М.Х. Оптимизационные задачи распределения ресурсов при планировании производства микросэлектронных изделий. /Прилуцкий М.Х., Власов В.С. //Системы управления и информационные технологии, Воронеж, 2009, №1(35), с. 38-43

*Статьи и материалы конференций*

3. Прилуцкий М.Х. Об одной задаче построения конвейерных расписаний. /Прилуцкий М.Х., Власов В.С. //Тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции ИСТ-2005, Нижний Новгород, 2005, стр. 116-117
4. Прилуцкий М.Х. Использование процедур метода ветвей и границ для решения задач многоресурсного сетевого планирования. /Прилуцкий М.Х., Власов В.С. //Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ-2006, Нижний Новгород, 2006, стр. 59
5. Власов В.С. Дискретно-управляемые системы распределения ресурсов в сетевых структурах. /Власов В.С. //Материалы докладов XI Нижегородской сессии молодых ученых. Технические науки, 2006, стр. 9-10
6. Власов В.С. Распределение ограниченных ресурсов в сетевых канонических дискретно-управляемых системах. /Власов В.С., Прилуцкий М.Х. //Материалы конференции “Технологии Microsoft в теории и практике программирования”, Нижний Новгород, издательство ННГУ, 2006, стр. 49-51
7. Прилуцкий М.Х. Метод комбинирования эвристических алгоритмов для конвейерных задач теории расписаний. / Прилуцкий М.Х., Власов В.С. //Электронный журнал "Исследовано в России", 086, стр. 901-905, 2007 <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/086.pdf>
8. Власов В.С. Метод комбинированных эвристик построения конвейерных расписаний. /Власов В.С., Прилуцкий М.Х. //Материалы конференции “Технологии Microsoft в теории и практике программирования”, Нижний Новгород, издательство ННГУ, 2007, стр. 211-212
9. Прилуцкий М.Х. Стохастические алгоритмы для конвейерных расписаний. /Прилуцкий М.Х., Власов В.С. //Тезисы докладов

- международной научно-технической конференции ИСТ-2007, Нижний Новгород, 2007, стр. 215-217
10. Власов В.С. Распараллеливание метода ветвей и границ решения конвейерной задачи построения оптимального по быстродействию расписания. //Власов В.С. //Материалы Седьмой Международной Конференции “Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах”, 2007, стр. 86-89
  11. Власов В. С. Использование эвристических алгоритмов для ускорения поиска точного решения конвейерной задачи. //Власов В.С. //Материалы конференции “Технологии Microsoft в теории и практике программирования”, Нижний Новгород, издательство ННГУ, 2007, 2008, стр. 73-75
  12. Власов В.С. Результаты вычислительного эксперимента для анализа эффективности алгоритмов решения конвейерной задачи теории расписаний. //Власов В.С. //Материалы конференции “Технологии Microsoft в теории и практике программирования”, Нижний Новгород, издательство ННГУ, 2009, стр. 66-67
  13. Власов В.С. Стохастические алгоритмы решения задач распределения ресурсов в канонических структурах. //Власов В.С. //Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ-2009, Нижний Новгород, 2009, стр. 299-300
  14. Власов В.С. Задачи упорядочения и распределения ресурсов при изготовлении изделий микроэлектронного производства. //Власов В.С. //Труды Нижегородского государственного технического университета. Серия: Системы обработки информации и управления. Вып. 16. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2009, с. 31-36.

Подписано в печать 30.10.09. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 281.

---

Отпечатано в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова».  
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-486