

**На правах рукописи**

**ЗАГИДУЛЛИН Равиль Рустэм-бекович**

**СИСТЕМА ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО  
МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ**

**Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Уфа 2006**

Работа выполнена  
на кафедре автоматизированных технологических систем  
Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный консультант

д-р техн. наук, проф.  
**Зориктуев Вячеслав Цыденович**

Официальные оппоненты

д-р техн. наук, проф.  
**Фролов Евгений Борисович**

д-р техн. наук, проф.  
**Саксонов Евгений Александрович**

д-р техн. наук, проф.  
**Селиванов Сергей Григорьевич**

Ведущая организация

Институт технологии и организации производства  
ОАО НИИТ

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.03 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д-р техн. наук, проф.

**Мионов В.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Эффективность современных машиностроительных производств во многом определяется уровнем управления и организации производственных и технологических процессов (ТП), возможностью снижения издержек временных и материальных ресурсов с целью обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции. Во многом именно эти требования обуславливают в последние годы актуальность развития и использования таких типов систем управления предприятиями и производствами, как MRPII, ERP, MES.

Одним из ключевых элементов этих систем, в плане снижения издержек непосредственно на этапе производства продукции, являются системы и модули оперативно-календарного планирования (ОКП). Именно эти системы обеспечивают оптимальность расписаний работы оборудования во времени и формирование директив для последующего этапа управления. Системы ОКП, по сути, являются организующим звеном между структурой производства, принятыми на производстве организационными особенностями функционирования оборудования, технологическими процессами изготовления номенклатуры деталей и управлением производственного процесса. Тем самым, от точности представления информации, как по номенклатуре изделий, так и по параметрам оперативных планов в ОКП, методов решения задач планирования, от адекватности математических моделей систем ОКП зависят точность формируемых плановых заданий и, в последующем, – управление объектами производства, что влияет на эффективность производственной системы в целом. Поэтому решение задач, направленных на повышение эффективности функционирования автоматизированного производства в машиностроении за счет применения современных методов ОКП, является крайне актуальной проблемой.

Вопросам ОКП с точки зрения планирования работ во времени, управления и организации производством было посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых.

Постановке и решению задач планирования в производстве с точки зрения классических методов математического программирования, теории графов и сетей были посвящены работы С. А. Ашманова, Р. Беллмана, Е. С. Вентцель, А. Ф. Горшкова, Дж. Б. Данцига, С. Дрейфуса, Л. В. Канторовича, В. Г. Карманова, Н. Кристофидеса, Э. А. Мухачевой, Т. Саати, М. Свами, Д. Филлипса и других авторов.

Вопросам планирования с точки зрения аппарата теории расписаний были посвящены исследования Ф. Баптиста, П. Брукера, В. С. Гордона, Д. С. Джонсона, С. М. Джонсона, Р. В. Конвея, В. Л. Максвелла, Л. В. Миллера, Р. Паркера, М. Пинедо, Т. П. Подчасовой, С. В. Севастьянова, Ю. Н.

Сотскова, В. А. Струсевич, В. С. Танаева, В. Г. Тимковского, Я. М. Шафранского и других авторов.

В рамках разработки экономико-математических моделей планирования известны работы С. А. Думлера, М. Б. Игнатьева, Н. Б. Мироносецкого, В. А. Мясникова, В. А. Петрова, Е. И. Перовской, В. М. Португала, Л. И. Смоляра, С. А. Соколицына, К. Г. Татевосова и других авторов.

Вопросы организации и управления производством рассматривались в работах Б. С. Балакшина, М. Х. Блехермана, Б. Г. Ильясова, Б. И. Кузина, Г. Г. Куликова, В. И. Левина, В. Г. Митрофанова, А. А. Первозванского, А. В. Речкалова, Р. Л. Сатановского, Ю. М. Соломенцева, Н. М. Султан-заде, Е. Б. Фролова, Б. Я. Фалевича, А. Д. Чудакова и других авторов.

Данные работы являются базисом для дальнейших исследований и учитывались автором в своей работе.

Наибольшую остроту вопросы ОКП приобретают в автоматизированных производственных системах (АС) – ГПС, интегрированных и интеллектуальных системах в условиях мелкосерийного и единичного производства, поскольку в этих случаях вопросы эффективности ОКП пересекаются с задачами управления производственными системами и оборудованием, задачами управления жизненным циклом продукции.

Анализ развития и использования в машиностроении различных систем ОКП показал, что для случаев автоматизированного производства чаще всего проблемой является даже не  $NP$ -сложность самого процесса формирования расписаний работы оборудования, что в какой-то мере снимается использованием быстрых эвристических алгоритмов с помощью современной вычислительной техники, а адекватность математических моделей ОКП существующему разнообразию оборудования, производственных и технологических факторов, организационных структур на предприятиях. Использование частных методик ОКП в различных системах управления предприятиями как для производств с невысоким уровнем автоматизации, так и для гибких и интегрированных производств, приводит к необходимости существенной доработки функционала существующих систем ОКП под конкретные условия производства, что увеличивает сроки внедрения этих систем и расходы предприятий.

Причины этого кроются в отсутствии комплексного подхода к построению систем ОКП, в их особенности для АС и приближенном характере большинства математических моделей ОКП, не учитывающих множество параметров технологического, организационного и стохастического характера при формировании расписаний работы основного и вспомогательного автоматизированного оборудования. При этом в существующих системах планирования отсутствует возможность построения расписаний для таких классов обслуживающих устройств (ОУ), как: транспортные средства (ТС), складские системы (СС), бригады наладчиков (БН) и др. Среди существующих моделей ОКП не представляется возможным выделить какую-либо из них с целью создания комплексной модели планирования с возможностями ее

адаптации под различные условия производства и получения адекватных моделей.

В связи с вышеизложенным, разработка системы ОКП для АС, математических моделей ОКП и их принципов построения в составе систем управления автоматизированными производственными системами механической обработки является важной научной проблемой.

Работа выполнялась на кафедре автоматизированных технологических систем УГАТУ в рамках госбюджетной НИР «Разработка автоматизированной системы проектирования и моделирования станочных модулей и комплексов» (2000 – 2005 гг.); грантов министерства образования и науки РФ в рамках НИР «Разработка методов построения системы ERP на промышленном предприятии, производящем сложную наукоемкую продукцию», раздел – «Моделирование основных бизнес-процессов предприятия, поддерживающих производство сложной продукции» (2004) и «Разработка концепции комплексной подготовки специалистов в области CALS-технологий и ее апробация на базе УГАТУ» (2005), программой «Конверсия и высокие технологии» (1997 – 2000 гг.); федеральной целевой программой «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки» (1997 – 2004 гг.), а также в соответствии с планами научно-исследовательских работ кафедры автоматизированных технологических систем УГАТУ.

### **Цель работы**

Цель – решение важной научно-технической проблемы, состоящей в создании системы оперативно-календарного планирования на основе комплексных моделей для автоматизированных механообрабатывающих мелкосерийных и единичных производств, обеспечивающих повышение их эффективности.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработать концепцию и структуру системы ОКП для автоматизированных производств, обладающую возможностями интеграции с системами САПР ТП, диспетчирования и управления.
2. Разработать комплексный метод анализа и формирования оптимального множества номенклатуры деталей на различных стадиях планирования.
3. Разработать методы формализации временных параметров расписаний различных обслуживающих устройств в автоматизированном производстве.
4. Разработать комплексную модель ОКП для различных видов производств с учетом влияния структурно-компоновочных и организационно-технологических параметров обслуживающих устройств с возможностью автоматизированного синтеза частных моделей.

5. Разработать метод управления технологическими процессами в системе ОКП на основе их структурной оптимизации на стадии планирования и изготовления.

6. Разработать методы оценки надежности расписаний в системе ОКП с учетом стохастичности протекающих процессов в АС.

7. Разработать и внедрить в производство автоматизированную систему ОКП в виде комплекса программного обеспечения (ПО).

### **Методы исследования**

При разработке структуры системы ОКП задача рассматривалась с точки зрения системного подхода к классификации входной и управляющей информации в ОКП, а также синтезу системы ОКП. При разработке метода определения состава и длительности процесса переналадок использовались основы теории автоматов и теории множеств. При разработке предварительных методов планирования использовались методы математического программирования, аппарат сетей Петри. При определении зависимостей между множеством временных параметров расписаний и структурных особенностей элементов АС, а также при разработке комплексной модели планирования, при разработке межцеховых моделей планирования использовались теория графов и сетей, аппарат теории расписаний, методы многокритериальной оптимизации. При разработке технологических основ проектирования альтернативных ТП в системе ОКП использовались основы технологии машиностроения, теория размерных цепей и теория графов. При разработке комплексного метода оценки надежности расписаний использовались теория вероятностей, теория массового обслуживания и методы дискретной оптимизации.

### **На защиту выносятся**

1. Структура системы ОКП для автоматизированных производств.
2. Комплексный метод формирования множества номенклатуры деталей как совокупность методов предварительного планирования и имитационного моделирования расписаний в автоматизированных системах.
3. Методы формализации временных параметров расписаний различных обслуживающих устройств в АС.
4. Комплексная модель ОКП и рекурсивный метод синтеза моделей планирования. Модель межцехового планирования, модель планирования для единичного производства с нерегулярным представлением состава номенклатуры деталей.
5. Метод получения множества альтернативных ТП на основе дифференциации и синтеза операционной технологии.
6. Методы оценки надежности расписаний в зависимости от стохастического характера процессов, протекающих в АС, а также методы и модели оптимизации состава оборудования производственной системы с точки зрения задач ОКП.

7. Автоматизированная система оперативно-календарного планирования класса MES – PolyPlan в виде комплекса программного обеспечения.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Новизна предложенной структуры системы ОКП для АС состоит в том, что разработанная система ОКП обладает возможностями оперативного синтеза модели планирования в зависимости от условий производства, является интегрированной с системами САПР ТП, диспетчирования и управления. Данный подход позволяет унифицировать структуру ОКП в составе различных систем управления предприятиями и сократить затраты на ее адаптацию на предприятиях.

2. Новизна разработанного метода имитационного моделирования расписаний работы АС заключается в разработанном динамическом методе синтеза сетей Петри, который отличается от существующих тем, что объектом моделирования является множество ТП номенклатуры деталей, и на основе предложенных макропроцедур, терминальных подсетей и функции перехода появляется возможность формирования многополюсных сетей Петри различной размерности и сложности как функции от времени и номенклатуры деталей.

3. Новизна разработанных методов формализации таких параметров расписаний, как длительность операций переналадок оборудования и операций обслуживания заявок складскими и транспортными средствами заключается в том, что данные параметры представлены в аналитическом виде с учетом технологических, структурно-компоновочных и организационных особенностей автоматизированного производства.

4. Новизна разработанной комплексной математической модели ОКП заключается в том, что ее синтез основан на принципе рекурсии с параметром количества классов обслуживающих устройств, что позволяет использовать блочно-модульную организацию модели и соответствующего ПО, создавать, в зависимости от конкретных условий, различные по адекватности частные модели, в том числе, модели межцехового планирования и единичного производства, а также использовать алгоритм автоматизации синтеза математических моделей.

5. Новизна разработанного метода дифференциации и последующего синтеза операционной технологии изготовления деталей состоит в том, что данный метод позволяет на базе исходного ТП получить множество равнозначных по точности изготовления альтернативных ТП, которые могут быть выбраны на последующем этапе планирования, что позволяет получать оптимальные расписания для АС в целом, а также обуславливает возможность адаптации ТП с точки зрения его переносимости и интерпретируемости, в зависимости от конкретного состава оборудования и технологического оснащения, на другие производства.

6. Новизна предлагаемых методов оценки надежности расписаний в системе ОКП заключается в том, что для различных моделей планирования оценивается выполнимость и напряженность расписаний с учетом стохастичности процессов в АС, что позволяет определять конкретные мероприятия для устранения причин невыполнения расписаний в установленные сроки, а также выбирать оптимальный состав оборудования АС с точки зрения выполнения заказов.

### **Практическая ценность и реализация работы**

Полученные в диссертационной работе результаты исследований позволили разработать концептуальные основы создания комплексных математических моделей ОКП и на их основе разработать метод построения систем ОКП для автоматизированных производств, обладающий свойствами адаптации моделей планирования под конкретные условия предприятий.

Предложен ряд частных моделей планирования, которые могут быть использованы не только в ОКП, но также для решения задач формирования портфеля заказов предприятия, для планирования производств с единичным характером выпуска изделий, в системах управления классов ERP/MRP II в качестве инструментов объемного планирования с учетом ряда важных, ранее не учитываемых, параметров планирования. Предложенный метод имитационного моделирования позволяет как автоматизировать процесс моделирования с помощью сетей Петри, так и получать модели различной сложности независимо от количества объектов и их состояний.

Предложенные методы аналитического определения параметров расписаний позволяют повысить точность и достоверность формируемых расписаний работы оборудования с учетом технологических и организационных особенностей различных производственных структур.

Предложенная комплексная математическая модель ОКП позволяет учитывать широкий спектр технологических, организационных и структурно-компоновочных особенностей различных производств и состава оборудования, что обеспечивает повышение точности составления расписаний работы не только технологического, но и вспомогательного оборудования для производственных структур с любым уровнем автоматизации.

Разработанный метод дифференциации и последующего синтеза операционной технологии изготовления деталей позволил впервые разработать и предложить основы интеграции разрозненных ранее систем АСТПП/САПР ТП и ОКП в рамках общих критериев и задач управления производством. Данный метод может быть использован также на этапе проектирования ТП, что позволяет повысить гибкость технологического проектирования при различных условиях производства.

Предложенные методы оценки надежности расписаний работы оборудования позволяют учесть стохастический характер процессов, протекающих в автоматизированном производстве, прогнозировать влияние тех



или иных отказов оборудования на выполнимость расписания всей производственной системы и, в ряде случаев, оптимизировать ее структуру с точки зрения выполнимости расписаний.

Методологические и теоретические результаты работы позволили разработать и внедрить в производство автоматизированную систему ОКП класса MES – PolyPlan, являющуюся действенным инструментом снижения временных и материальных затрат в мелкосерийном и единичном производствах.

Результаты работы были внедрены на: ОАО «Стерлитамак-М.Т.Е.» при создании системы управления жизненным циклом производства современного металлорежущего оборудования; на ОАО «УМПО» при адаптации и реинжиниринге системы ОКП производственного модуля VAAN V; в учебном процессе Уфимского государственного авиационного технического университета в рамках дисциплины «Автоматизация технологических процессов и производств» по направлениям 220200 «Автоматизация и управление» и 220300 «Автоматизированные технологии и производства», а также в курсовом и дипломном проектировании. Совместно с ОАО «Аскон» (РФ) были разработаны механизмы интеграции для последних версий серийных продуктов класса САПР ТП/АС ТПП «Вертикаль» и PLM:«ЛОЦМАН» с системами ОКП и MES-системами.

Разработанные математические модели ОКП могут быть использованы при планировании в АС, в интегрированных и интеллектуальных производственных системах, а также для ряда систем с невысоким уровнем автоматизации.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных, всесоюзных, всероссийских, региональных научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах с 1987 по 2006 гг., в том числе: «Логическое управление с использованием ЭВМ» (Москва, 1988); «Проблемные вопросы развития и повышение эффективности внедрения автоматических производственных комплексов с разной степенью технологической гибкости» (Ташкент, 1989); «Конструкторско-технологическая информатика, автоматизированное создание машин и технологий» (Москва, 1989); «Автоматизация машиностроения на базе гибких технологических систем и робототехнических комплексов» (Баку, 1989); «Ресурсосберегающие технологии в механосборочном производстве» (Киев, 1990); «Качество и эффективность технологических систем механообработки» (Краматорск, 1991); «Программные средства автоматизации проектирования и управления» (Ижевск, 1991); «Компьютерные технологии в промышленности» (Киев, 1994); «Технология механообработки: физика процессов и оптимальное управление» (Уфа, 1994); «Автоматизированные технологические и мехатронные системы в машиностроении» (Уфа, 1997); «Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий» (Уфа, 1997);

«Оптимальное управление мехатронными станочными системами» (Уфа, 1999); «Интеллектуальные мехатронные станочные системы» (Уфа, 2003); «Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства» (Волгоград, 2003); «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (Санкт-Петербург, 2003); «Информационные технологии и системы: новые информационные технологии в науке, образовании, экономике» (Владикавказ, 2003); «Материалы и технологии XXI века» (Пенза, 2004); «Информационные модели экономики» (Москва, 2004); «Татищевские чтения» (Тольятти, 2004); «Современные наукоемкие технологии в промышленности России: высокопроизводительные вычисления и CALS-технологии» (Уфа, 2005); «Конструкторско-технологическая информатика 2005» (Москва, 2005); «Мехатроника, Автоматизация, Управление» (Уфа, 2005); «Информационные модели экономики» (Москва, 2006). Работа обсуждалась на выездных заседаниях Головного совета «Машиностроение» ВАК (2000, 2004 гг.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 75 печатных работ, в том числе 1 монография, 2 учебных пособия (1 пособие с грифом УМО АМ), 21 статья в рецензируемых центральных журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 325 наименований и приложения, изложенных на 443 страницах, содержит 110 рисунков и 29 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы анализа и разработки методологических и математических основ ОКП для автоматизированного производства, формулируются цель и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту, изложены краткая характеристика работы и сведения о ее апробации.

**Первая глава** посвящена анализу состояния вопроса оперативно-календарного планирования в АС в условиях мелкосерийного и единичного производства, в системах управления предприятиями и производственными процессами, содержит обоснование цели и задач исследования.

Показаны место и роль систем ОКП в общей структуре систем управления предприятиями различных классов – MRP II, ERP, MES, APS. Системы ОКП, как инструмент цехового планирования, входят в структуру контура планирования и управления производством. В связи с этим перед системами ОКП, являющихся ядром современных MES-систем, возникает широкий круг задач не только по формированию расписаний, план-графиков

работы оборудования, но также задач анализа номенклатуры выпуска продукции, моделирования производственных расписаний для различных условий и задач интеграции с САПР ТП/АСТПП, системами диспетчирования и управления. Это обуславливает необходимость разработки систем ОКП как многофункционального инструмента планирования с соответствующей структурой.

Анализ технических средств и решений, используемых в автоматизированном производстве, показал большое разнообразие технологических, вспомогательных средств, компоновочных и организационно-технологических решений при широком разнообразии номенклатуры выпуска продукции мелкосерийного и единичного производства. Анализ обслуживания заявок для различных объектов в АС – гибких производственных модулей (ГПМ), транспортных средств (ТС) и складских систем (СС) показал неоднозначность определения многих временных параметров расписаний и необходимость их учета в аналитическом виде с целью более точного формирования расписаний.

Анализ существующих подходов к формированию расписаний позволил выявить достаточно сложную и важную проблему управляемости, которая заключается в том, что большинство методик и систем планирования формируют расписания только для основного класса обслуживаемых устройств – ГПМ. Отсутствие возможности формирования комплексных расписаний для всего спектра оборудования – ГПМ, ТС и СС приводит к существенной потере точности расписаний и в ряде случаев к их невыполнимости.

Рассмотрены проблемы взаимосвязи систем ОКП, САПР ТП/АСТПП, функционирующих в настоящее время как разрозненные системы в общей структуре производственного процесса с различными и, зачастую, противоречивыми критериями выпуска продукции. Пути решения этих проблем лежат в плоскости интеграции указанных систем, где в основу должен быть положен принцип управляемости технологическими процессами во времени.

Были рассмотрены проблемы учета стохастичности протекающих процессов при построении и оценке формируемых расписаний, которые имеют номинальный характер, проблемы управления и диспетчирования в плане выполнимости расписаний, проблемы составления расписаний для комплексов цехов, связанных общностью выпуска изделий.

Анализ литературы, различных систем и методов планирования показал, что основа многих существующих проблем кроется в отсутствие комплексного подхода к формированию математических моделей систем ОКП для условий автоматизированного производства.

На основании проведенного анализа были разработаны требования к системам ОКП, определены основные направления работы, цели и задачи.

**Во второй главе** была предложена концепция структуры системы ОКП и ее содержание в виде комплексного инструмента формирования и моделирования расписаний на различных этапах планирования, проведен анализ параметров расписаний и разработан комплексный метод анализа номенклатуры, разработан ряд математических моделей формирования расписаний работы оборудования на различных этапах планирования с учетом множества факторов.

Предложенная в работе структура системы ОКП класса MES (рис. 1) имеет несколько функциональных модулей ( $M1 - M5$ ), отвечающих за различные задачи планирования. Данная концепция построения систем ОКП позволяет использовать их как для случая системного варианта структуры АСУП (при наличии системы класса ERP/MRP II), так и для случая локального варианта. Кроме того, функции модуля анализа номенклатуры и предварительного назначения позволяют адаптировать систему ОКП под различные системы ERP/MRP II. При этом система ОКП является ядром MES-систем и ее функциональные возможности и особенности математических моделей являются результатом синтеза, отражают конкретные особенности и требования производства на момент начала планирования.

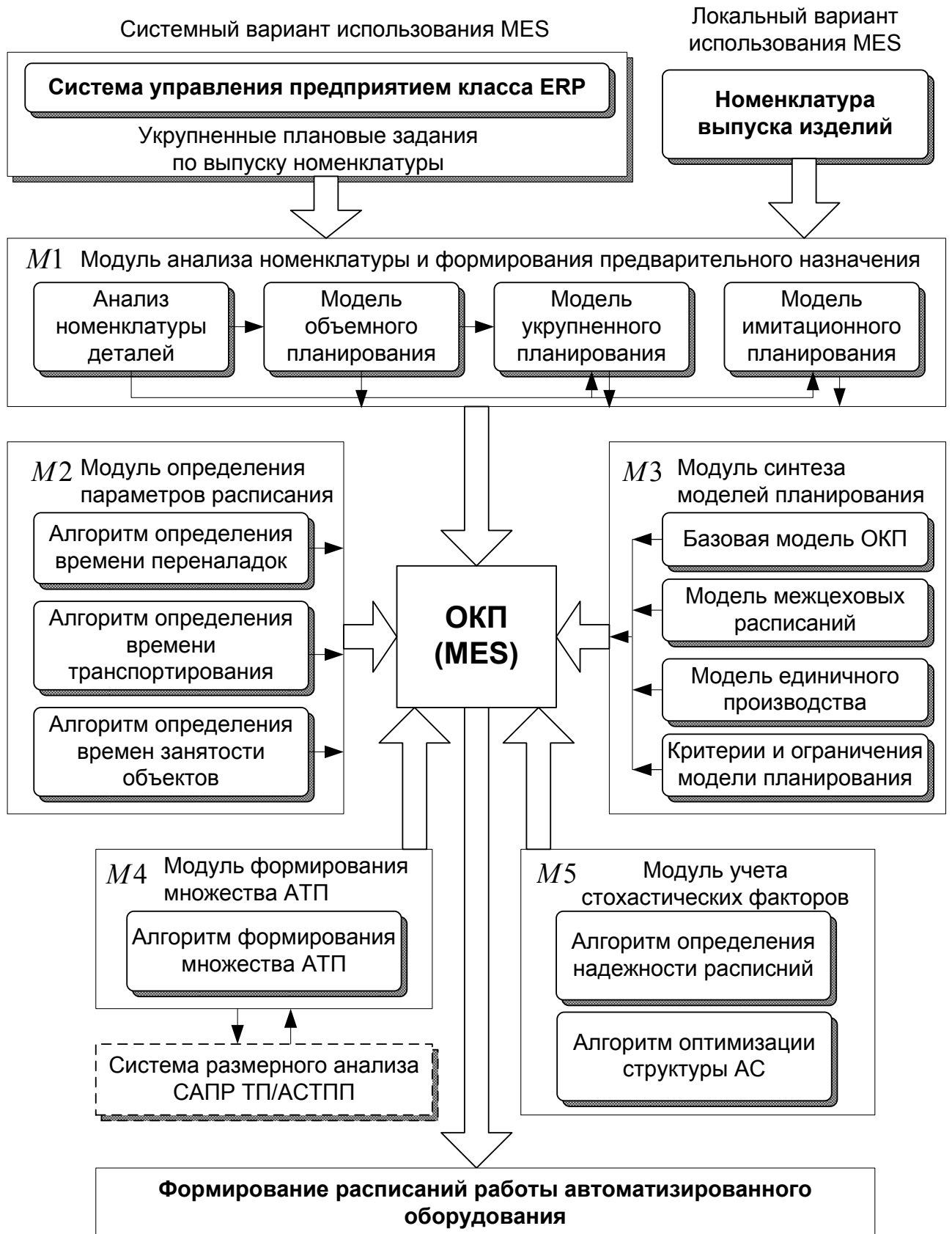


Рис. 1. Концепция системы ОКП класса MES

Содержание функциональных модулей было реализовано в данной работе на уровне математических моделей и программного обеспечения.

Такой подход, в зависимости от поставленной задачи планирования и конкретных условий различных производственных структур, позволяет облегчить синтез частных математических моделей в ОКП и использовать сторонние разработки при интеграции систем ОКП с системами диспетчирования, управления и САПР ТП/АСТПП в общей структуре АСУП.

Анализ параметров расписаний позволил выявить не только их требуемый состав для планирования в условиях автоматизированного производства, но также тот перечень, который, с целью повышения точности расписаний, должен определяться аналитически в последующих математических моделях. К таким параметрам, многие из которых являются взаимосвязанными, прежде всего, относятся: состав и длительность операций переналадок в ГПМ при поступлении единиц планирования (ЕП) другого наименования; времена транспортных операций; длительности обслуживания заявок ГПМ, ТС и СС на операциях транспортирования, складирования и передачи партий ЕП, а также параметры простоев данных ОУ на различных операциях.

Единицы планирования на множестве номенклатуры запуска  $M = \{m\}$  представлены в виде партии деталей  $e_{ijk}$  ( $i = 1, m; j = i, p_i; k = 1, n$ ) с величиной партии  $a_{ij}$ , определяемой по существующим методикам, и временем обработки одной ЕП  $t_{Oe_{ijk}}$ , где  $m$  – количество наименований множества номенклатуры деталей,  $p_i$  – количество операций  $i$ -й детали по ходу ТП,  $k$  – номер ГПМ из общего состава  $N = \{n\}$ , на который назначена обработка данной ЕП.

Метод анализа конкретной номенклатуры запуска  $M$  на общем множестве портфеля заказов  $M^0$  носит поэтапный характер. При этом учитывались:

- наличие заготовок и комплектующих изделий;
- возможность обработки той или иной ЕП. При этом было введено понятие матрицы возможности обработки для той или иной ЕП  $e_{ijk}$  изделия  $d_i, i \in M$  на любом  $k$ -м оборудовании с булевым значением элементов данной матрицы –  $e_{ijk}^{BO} (1/0)$ ;

- возможность выполнения деталей на имеющемся горизонте планирования по напряженности заказов и срокам выпуска;

- возможность выполнения заказов по фонду времени оборудования. При этом как в данном методе, так и в последующих моделях множество ЕП  $e_{ijk}$  рассматривалось с учетом альтернативности назначения на различные ГПМ, для чего в работе было введено понятие коэффициента альтернативности номенклатуры запуска  $M$

$$k_{Ma} = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} e_{ijk}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} e_{ij}}. \quad (1)$$

Чем больше значение  $k_{Ma}$  на любом множестве  $M$ , тем больше время счета требуется для любого алгоритма составления расписания. Данный метод анализа номенклатуры изделий может быть использован также при формировании портфеля заказов предприятий.

При определении состава и длительности операций переналадок в ГПМ было введено понятие технологического состояния ГПМ, которое определялось множеством постоянных технических  $T_{ГПМk}$  и переменных технологических характеристик  $T'_{ГПМk}$ , отражающих имеющийся состав ресурсов для обработки текущей ЕП, т.е. для ГПМ учитывалась предыстория планирования с учетом накопления и изменения состава технологических ресурсов. Состав переналадок для любого  $k$ -го ГПМ  $Q_{l,l+1}$  при смене его состояния  $(l,l+1)$  определялся с учетом состава ресурсов  $T_{e_{ijk}}$ , требуемых для вновь поступающей ЕП

$$[Q_{l,l+1}]_k = [T_{e_{ijk}}] \setminus [T'_{ГПМk}]. \quad (2)$$

При известных длительностях отдельных операций переналадок задача определения длительности всего комплекса операций переналадок  $t_{ПЕРe_{ijk}}$  в дальнейшем решалась как задача составления расписания для детерминированной одностадийной системы обслуживания с  $n^0$  параллельными обслуживающими устройствами (наладчиками) по критерию минимальной календарной длительности с учетом условия предшествования операций переналадок и возможности их совмещения. Данный подход к определению величины  $t_{ПЕРe_{ijk}}$  позволил повысить точность формируемых расписаний в АС.

В работе было предложено предварительное планирование проводить с помощью различного класса математических моделей. Причина такого подхода заключается в том, что не всегда удается лишь с помощью одного класса моделей решить все задачи ОКП в АС. В ряде случаев задачу можно решить только с помощью следующего комплекса взаимосвязанных моделей предварительного характера: 1) моделей объемного характера, позволяющих оценить приблизительную выполнимость расписания по объему, ресурсам времени существующего оборудования; 2) предварительных моделей планирования, позволяющих оценить напряженность расписаний по каждой смене; 3) имитационных моделей, позволяющих легко оперировать такими

событиями, как отказы, незапланированные ремонты и т.п. без изменения содержания формального образа общей модели планирования.

В математической модели объемного характера, в отличие от существующих, впервые были учтены такие параметры, как: время переналадки ГПМ, альтернативность выполнения ЕП с учетом матрицы возможности обработки, фонды времени ТС и наличие операции транспортирования в виде булевой переменной, определяемой в процессе решения

$$e_{ijk}^T \begin{cases} 1, & \exists e_{ij-1,s} | e_{ij-1,s} \subset \Phi_{Cs} \vee s \neq k, \quad s, k \in N \\ 0 \end{cases}, \quad (3)$$

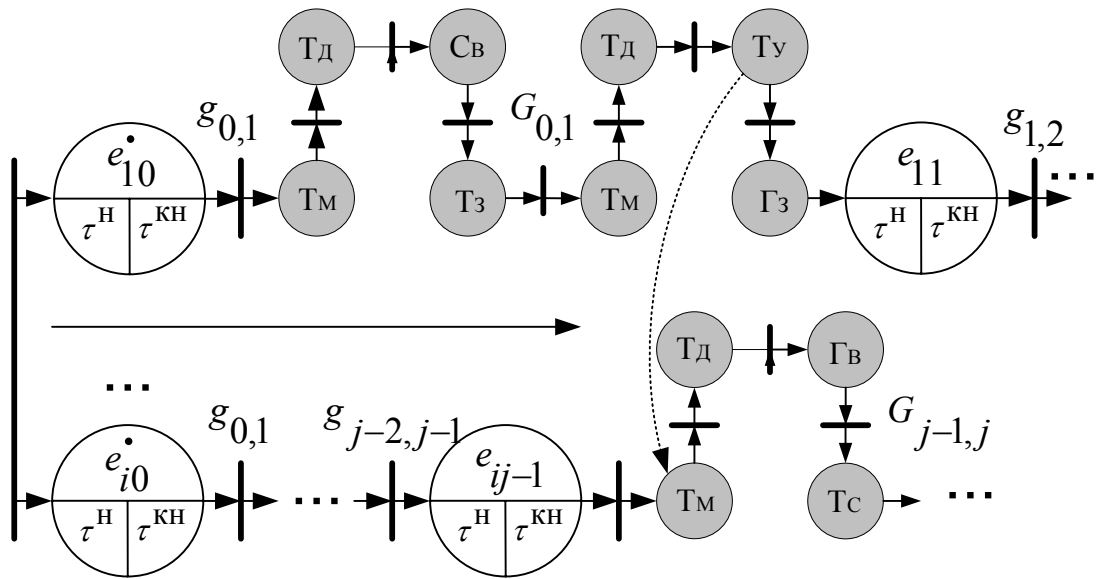
где  $\Phi_{Cs}$  – фонд времени работы ГПМ. Такой подход, учитывающий в объемной модели два класса ОУ, позволил не только создавать более точные назначения, но в ряде случаев, для ЕП с небольшим количеством операций, получать назначения, близкие к расписаниям работы оборудования.

В основу разработанной предварительной (укрупненной) математической модели был положен принцип оценки оптимального распределения всего множества номенклатуры  $M$  между сменами для случая многосменного расписания. При этом номенклатура запуска  $M$  была представлена как множеством отдельных деталей  $M^e$ , так и множеством деталей  $M^E$ , входящих в сборочные единицы в пределах плана с совместными операциями сборки, контроля и испытаний. В результате была получена возможность анализа оптимального распределения номенклатуры в пределах общего горизонта планирования  $\theta$  на отдельные смены с горизонтами планирования  $\theta_n$  сменного характера.

Имитационная модель формирования расписания работы АС, представленная в работе, базируется на аппарате сетей Петри. Построение таких моделей для АС, как правило, является сложной задачей ввиду большого количества объектов в АС, их состояний и различных ситуаций. Данная проблема была решена за счет того, что в основу был положен анализ состояний не ОУ, как это делалось ранее, а ЕП на их последовательности переходов  $P(e_{ij} \Rightarrow e_{ij+1})$  согласно ТП. Анализ и декомпозиция различных сетевых моделей позволили выделить состав макропроцедур, представляющих собой последовательности действий ОУ для осуществления переходов  $P(e_{ij} \Rightarrow e_{ij+1})$ , а также библиотеку терминальных процедур в виде конечных функциональных подсетей Петри  $G_{j-1,j}$ , отвечающих за те или иные однозначные операции над ЕП (загрузка ЕП в ГПМ, перемещение ТС между двумя объектами, установка ЕП на ГПМ и т.д.). Алгоритм синтеза позволяет определять требуемый состав макро и терминальных процедур, моменты начала и окончания операций –  $\tau^H$ ,  $\tau^{KH}$  (рис. 2).



Сеть Петри при таком подходе формируется динамически, в процессе моделирования. При этом на любой момент времени отражаются только



текущие состояния, и размерность сети зависит только от количества ЕП, что позволяет формировать имитационные модели для АС с различным составом оборудования и структурно-компоновочными особенностями обслуживания заявок. Разработанное по данной модели программное обеспечение показало эффективность такого метода моделирования расписаний.

Рис. 2. Пример синтеза сетей Петри в имитационной модели *t(время)*

**В третьей главе** на основе анализа схем обслуживания заявок различными обслуживающими устройствами были определены аналитические зависимости для расчета основных временных параметров обслуживания, используемых в математических моделях составления расписаний.

В основе обслуживания различных объектов в АС лежат основные схемы обслуживания «ТС→СС», «ТС→ГПМ». Анализ этих схем обслуживания показал их широкое разнообразие, которое зависит от конструктивно-компоновочных особенностей применяемого оборудования, технологических и организационных особенностей производства, влияющих на порядок обслуживания. Классификация схем обслуживания ГПМ, СС и ТС с учетом различных особенностей структуры и порядка обслуживания (возможности совмещения различных вспомогательных операций, количество ОУ и мест на позициях загрузки-выгрузки СС и ГПМ, возможность пролеживания ЕП, комплексность обслуживания для различных заявок и др., всего – около 20 условий) позволила выявить основные типы схем обслуживания для существующего оборудования. При этом для каждой из схем (базовая библиотека содержит 26 схем) были определены аналитические зависимости для таких параметров расписаний, как: времена занятости ТС при установке и удалении объектов при работе со складом и ГПМ, времена занятости ГПМ и

складских устройств на операциях загрузки-выгрузки объектов, времена простоев ГПМ, СС и ТС на этих же операциях.

С целью формального отражения схем обслуживания в математических моделях ОКП была предложена структурная формула обслуживания (СФО), параметры которой идентифицируют конкретную схему обслуживания и позволяют определить указанные параметры расписания в модели ОКП (рис. 3):

$$\begin{aligned}
 &< \text{Идентификатор объекта} > \{ < \text{Операция} >, \\
 &\quad < \text{Момент начала обслуживания} >, \\
 &\quad < \text{Количество ОУ} >, \\
 &\quad < \text{Количество мест ОУ} >, \\
 &\quad < \text{Характер заявок} >, \\
 &\quad < \text{Совмещение с переналадкой ГПМ} > \}
 \end{aligned} \tag{4}$$

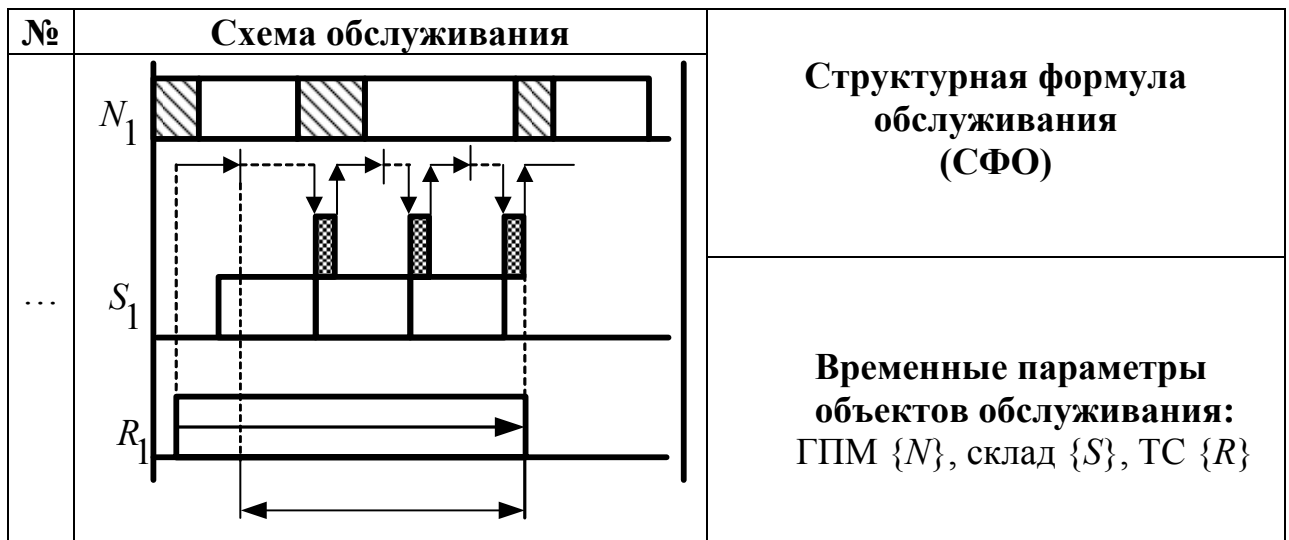


Рис. 3. Обобщенный пример фрагмента библиотеки схем обслуживания заявок

При появлении в производстве новых видов оборудования или изменении организационно-технологических особенностей обслуживания заявок разработанная библиотека схем может дополняться по разработанным правилам. Использование СФО в математических моделях ОКП позволяет повысить адекватность математической модели и точность определения моментов начала и окончания всех действий (обработки, транспортных и складских операций, простоев и др.), повысить гибкость формирования моделей ОКП для различных производственных структур.

При определении длительности транспортных операций, наряду с существующими методами, – заданием  $t_{TP}^{ab}$  в виде постоянной матрицы для

объектов  $i$  и  $j$  на компоновке АС ( $T_{\text{ОД}}[t_{\text{ОД}}^{ij} = \text{const}]$ ), а также заданием данной матрицы как кратчайшего пути ( $T_{\text{ТР}}[t_{\text{ТР}}^{ij} = f(i, j)]$ ) был предложен более точный метод, позволяющий определять  $t_{\text{ТР}}^{ij}$  с учетом занятости участков транспортного пути во времени

$$T_{\text{ТР}}[t_{\text{ТР}}^{ij} = f(i, j, t)]. \quad (5)$$

Для этого были разработаны соответствующие алгоритмы на базе алгоритма Дейкстры и алгоритма Ли. Программная реализация данного метода, который учитывает транспортные участки для ТС в качестве еще одного класса ОУ, показала повышение точности расписания для АС.

**Четвертая глава** посвящена вопросам разработки комплексной модели ОКП для различных видов производств с учетом влияния структурно-компоновочных и организационно-технологических параметров обслуживающих устройств с возможностью автоматизированного синтеза частных моделей.

При разработке классификации математических моделей ОКП учитывались такие особенности, как: количество ОУ, характер производства, количество классов ОУ, априорный характер фиксированности технологических маршрутов, детерминированность определения параметров расписания, учет структурно-компоновочных и организационных особенностей обслуживания заявок, детерминированность операционной технологии изготовления деталей, однородность моделей планирования, особенности единичного производства и групповой обработки различных деталей.

При разработке комплексной математической модели была поставлена задача создания такой модели, которая бы не только учитывала все разновидности частных моделей, но и имела бы возможность получения любого частного решения путем релаксации комплексной модели. Поэтому в основу был положен блочный принцип с функциональным содержанием каждого блока. Краткая нотация комплексной модели имеет следующий вид

$$I \{ F = \{F_1, F_2, \dots, F_f\} \rightarrow \min ; \quad (6)$$

$$II \begin{cases} e_{ijk} \{w_{ijk}, v_{ijk}\}; \\ \tau_{\text{Oe}_{ijk}}^H \geq \tau_{\text{Oe}_{ij-1s}}^{\text{KH}}, k, s \in N\{1, n\}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau_{\text{Oe}_{ilk}}^H \geq \tau_{\text{Oe}_{dp_d^s}}^{\text{KH}} \mid e_i \in M^E \vee e_d \in e_i; k, s \in N\{1, n\}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{III} \left\{ \begin{array}{l} \tau_{\tilde{n}k\theta}^i \in [\tau_{\theta}^i, \tau_{\theta}^{\tilde{e}i}], k=1, n; \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} e_{ijk} (a_{ij} \cdot t_{Oe_{ijk}} + t_{\text{ПЕР}} e_{ijk} + t_{\text{ОС}}^{\Sigma} e_{ijk}) \leq \Phi_{Ck}; \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{СФО}(N\{n\}); \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\text{IV} \left\{ \begin{array}{l} \tau_{\partial l\theta}^i \in [\tau_{\theta}^i, \tau_{\theta}^{\tilde{e}i}], l=1, r; \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^{Z_l} (t_{\text{ТР}}^{\Sigma} e_{lm} e_{ijk} + t_{\text{ПРТ}}^{\Sigma} e_{lm} e_{ijk}) \leq \Phi_{Tl}, l \in R\{1, r\}; \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{Tl}^H e_{ijk} \geq \tau_{Tl}^{\text{KH}} e_{mhq}, \quad l \in R; i, m \in M; k, q \in N\{1, n\}; \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\text{V} \left\{ \begin{array}{l} \tau_{\tilde{n}l\theta}^i \in [\tau_{\theta}^i, \tau_{\theta}^{\tilde{e}i}], l=1, S; \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^{Z_s} (t_{\text{СУ}}^{\Sigma} e_{lm} + t_{\text{СС}}^{\Sigma} e_{lm}) \leq \Phi_{Ckl}, \quad l \in S\{1, s, n\}; \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{C_l}^H e_{ijk} \geq \tau_{C_l}^{\text{KH}} e_{mhq}, \quad l \in S; i, m \in M; k, q \in N\{1, n\}; \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{СФО}(S\{s\}); \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\text{VI} \{B\{B_v\}\}. \quad (20)$$

Первый блок отражает множество частных критериев модели. Вторым блоком отражены условия задания ЕП (7) – либо в виде операций  $w_{ijk}$ , либо в виде переходов  $v_{ijk}$ , условия предшествования по выполнению ТП ЕП (8) в виде отношения моментов начала и окончания обработки –  $\tau_{\text{O}}^H$  и  $\tau_{\text{O}}^{\text{KH}}$ , условие предшествования (9) для ЕП, представляющих собой сборочные узлы. Третий блок отражает требования к функционированию ГПМ через моменты работы ГПМ (10) на временном интервале расписания  $\theta$ , включает ограничение по фонду времени (11) с учетом суммарной величины простоев ГПМ по различным причинам –  $t_{\text{ОС}}^{\Sigma} e_{ijk}$ , а также включает СФО (12) для множества

ГПМ  $N = \{n\}$ . Четвертый блок отражает требования к множеству ТС  $R = \{r\}$  и включает моменты их задействования (13), ограничения по фондам времени  $\Phi_{Tl}$  (14) на множестве заявок  $Z_l$  с учетом суммарного времени простоев ТС по различным причинам –  $t_{\text{ПРТ}}^{\Sigma} e_{lm} e_{ijk}$  и условие предшествования (15) при

обслуживании заявок, выраженное через моменты начала и окончания

транспортных операций –  $\tau_T^H l^{e_{ijk}}$  и  $\tau_T^{KH} l^{e_{mhq}}$ . Пятый блок отражает требования

к СС с учетом их моментом задействия (16) на интервале расписания  $\theta$ , ограничения по фондам времени ОУ СС  $\Phi_{Ckl}$  (17) с учетом суммарных потерь

времени на операциях установки и удаления объектов –  $t_{CY}^{\Sigma} l_m$  и  $t_{CC}^{\Sigma} l_m$ ,

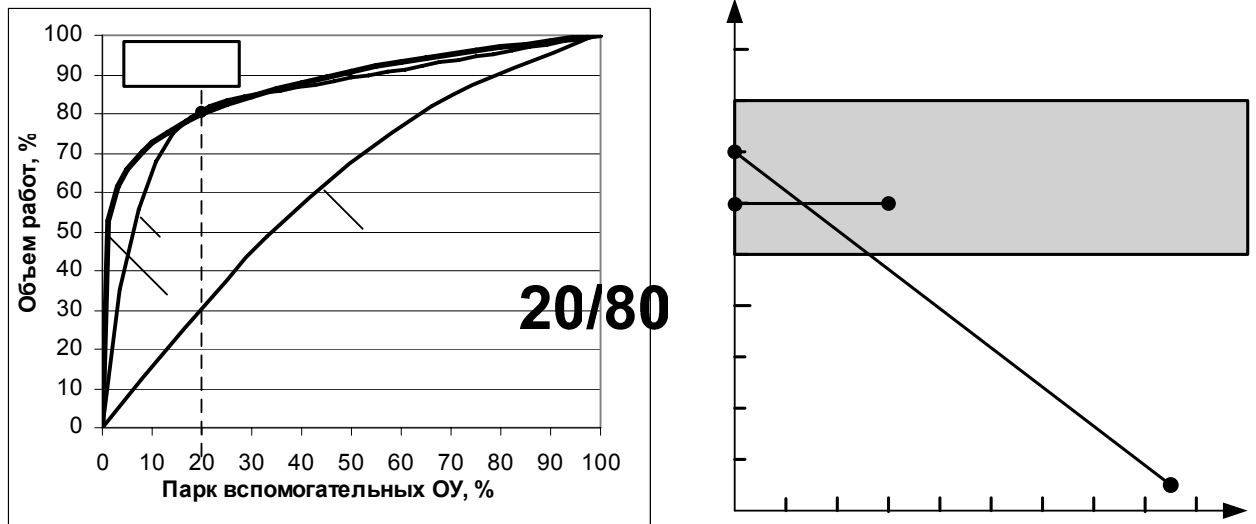
условия предшествования обслуживания складских заявок (18), выраженное через моменты начала и окончания этих операций –  $\tau_C^H l^{e_{ijk}}$  и  $\tau_C^{KH} l^{e_{mhq}}$ , а также

СФО (19) для множества СС  $S = \{s\}$ . Шестой блок отражает состав дополнительных ограничений (20).

Данная комплексная модель, имеющая нелинейный дискретный характер с наличием целочисленных и булевых параметров, использует множество из порядка 30 различных критериев временного и стоимостного характера, отражающих основные потери времени и ресурсов. На базе этого множества критериев возможно решение задач одно и многокритериальной оптимизации при построении расписаний в АС.

Для построения расписаний как с помощью комплексной модели, так и для всех частных моделей автором был разработан эвристический алгоритм, включающий процедуры ветвления на графе, процедуры динамического изменения горизонта планирования, процедуры смены окрестности поиска, процедуры построения первоначального графа поиска, процедуры исключения просмотренных контекстных последовательностей и др. Вычислительные эксперименты и результаты построения расписаний показали работоспособность комплексной модели, повышение точности при построении расписаний и хорошую сходимость при небольшом времени вычислений.

С целью реинжиниринга существующих систем ОКП с одним классом ОУ в виде технологического оборудования была разработана математическая модель, позволяющая дополнительно учитывать такой класс ОУ как ТС, что позволяет составлять для них собственные расписания. Данная возможность расширяет функционал существующих систем ОКП. В то же время, преимущество расписаний для АС, построенных с помощью комплексных моделей, по сравнению с существующими методами, заключается в существенном сокращении количества вспомогательных ОУ. При использовании существующих методов построения расписаний для вспомогательных ОУ (ТС, СС, БН) их характер загрузки подчиняется Парето-распределению, а при использовании комплексной модели – равномерному распределению (рис. 4,а). При этом использование существующих методов характеризуется неоправданным увеличением числа вспомогательных ОУ при снижении их коэффициента загрузки, в то время как расписания, полученные с использованием комплексной модели (рис. 4,б), характеризуются постоянством загрузки ОУ и существенным сокращением их количества (в



среднем, в два раза). Чем выше плотность работ на горизонте планирования, тем ощутимее преимущество комплексной модели.

Для случаев единичного производства, характеризующегося большими соотношения времени переналадки оборудования и обработки, была разработана математическая модель, в основу которой положен принцип нерегулярности партий запуска на некоторых операциях ТП. При дополнительном условии на величину партии эта же модель может отражать такой сложный для ОКП случай, как обработка деталей в сборе. Данная модель является релаксацией комплексной модели с дополнительными условиями на представление ЕП и позволяет сократить непроизводительные затраты времени.

Рис. 4. Сравнение методов построения расписаний для вспомогательных ОУ: А – существующие методы; В – предлагаемая комплексная модель; Р – Парето-распределение

Впервые при рассмотрении задач построения расписаний для нескольких цехов были разработаны математические модели, в основе которых лежит принцип общности ОУ в моделях различных цехов. Было показано, что в ряде случаев модели различных цехов могут не содержать критериев функционирования. Анализ моделей с совместными и выделенными ОУ показал, что для решения задачи построения межцеховых расписаний основным показателем является не состав ограничений модели цеха, а состав критериев. Данный подход позволил отказаться от неэффективного способа планирования на основе межцеховой кооперации и учесть различные, по составу критериев и ограничений, модели отдельных цехов в комплексной модели планирования.

Для построения расписаний в системе ОКП как для задач межцехового планирования, так и для отдельных цехов использовались методы многокритериальной оптимизации, в том числе, методы поиска на Парето-

оптимальных множествах для векторных критериев. Для задач построения межцехового расписания был предложен метод оптимизации на основе ранжирования цехов по приоритетам. Как для задач построения межцеховых расписаний, так и для отдельных цехов автором был разработан метод поиска оптимума, основанный на неопределенном значении весовых коэффициентов  $\alpha_i$  частных критериев  $F_i$ ; общего вектора  $F$ . При этом была введена матрица инцидентий между частными векторами

$$B = \left\{ \begin{array}{l} \beta_i > \beta_j \\ \beta_i = \beta_j \end{array} \right\}; \beta_i \in F_i; i, j \in [\overline{1, f}], \quad (21)$$

использование которой в дальнейшем позволяет получить отношения предпочтения между частными критериями в численном виде, что в итоге дает возможность вычисления отдельных коэффициентов  $\alpha_i$ . Использование этого метода для случая поиска оптимума на Парето-оптимальных множествах позволяет ввести однозначные условия транзитивности, что в дальнейшем облегчает поиск оптимума.

Впервые задача выполнимости расписаний при их пересчете в контуре диспетчирования систем ОКП и MES была решена с учетом влияния человеческого фактора ( $HF$ ), который характеризуется отсутствием времени на технологическую подготовку, невозможность быстрого реагирования персонала и т.д. При этом по аналогии с игровыми и многокритериальными моделями для каждого  $r$ -го ГПМ определялось множество уступок диспетчеру во времени

$$HF_r = \left\{ \begin{array}{l} \{HF_{rj}, j = \overline{0, A_r} \mid \exists \tau_{r,j}^H, a_{r,j}^B = 1, C_{r,j} > 0\} \\ \emptyset \end{array} \right., \quad (22)$$

характеризующееся возможностью  $a_{r,j}^B \in \{1,0\}$  выполнять новое расписание

на новом горизонте  $\theta'$  в момент времени  $\tau_{r,j}^H$  при условии, что изначальное

множество этих уступок  $A_r$  не является пустым и существует количественная мера  $C_{r,j}$  каждой уступки в стоимостном выражении. Решение данной

задачи было предложено как в рамках многокритериальной оптимизации, так и в рамках теории игр.

Анализ комплексной и частных моделей планирования показал, что синтез любой частной модели ОКП носит рекурсивный характер с параметром количества классов обслуживающих устройств. При этом основой является базовая модель, отражающая параметры номенклатуры, общие параметры модели (горизонт планирования, критерии, область существования

переменных) и ограничения по функционированию ГПМ. При учете любого нового класса ОУ (ТС, СС, бригады наладчиков и др.), адекватность модели достигается за счет добавления к базовой модели соответствующего функционального блока для данного класса ОУ из комплексной модели. Данное положение позволило разработать алгоритм синтеза математических моделей для систем ОКП и MES, позволяющий легко адаптировать математическое и программное обеспечение для конкретных условий производства.

**Пятая глава** посвящена вопросам управления технологическими процессами в системе ОКП на основе их структурной оптимизации на стадии планирования и изготовления с помощью разработанного метода формирования множества альтернативных технологических процессов (АТП).

Возможности управления ТП существенно расширяются, если существует возможность планирования на множестве АТП, что отмечалось в работах М. Х. Блехермана и др. авторов. Получение множества АТП для номенклатуры деталей  $M$  на стадии проектирования ТП, что было предложено Н. М. Капустиным, Г. Н. Васильевым, В. В. Павловым и др. авторами, в ряде случаев затруднено вследствие как лимита времени на разработку ТП, так и  $NP$ -сложности такой задачи. При решении данной проблемы были учтены тезисы Б. С. Балакшина, М. Х. Блехермана, В. П. Фираго и других авторов о перспективах дифференциации технологических операций (ТО) и возможном перераспределении технологических переходов между операциями с целью их синхронизации во времени. Поэтому автором был предложен метод получения множества АТП путем перераспределения технологических переходов между операциями и решить задачу управления производством на множестве АТП номенклатуры запуска по критериям АС. Тем самым, в рамках ОКП появляется возможность решения задач составления расписания с точки зрения задач плотной упаковки работ, имеющих альтернативное количество стадий выполнения и их длительностей на множестве временных осей оборудования.

Технологический процесс, в основе которого лежит план обработки и попереходная технология, в зависимости от выбираемого оборудования может иметь различные варианты группирования в операции (рис. 5).

Рис. 5. Варианты группирования операций



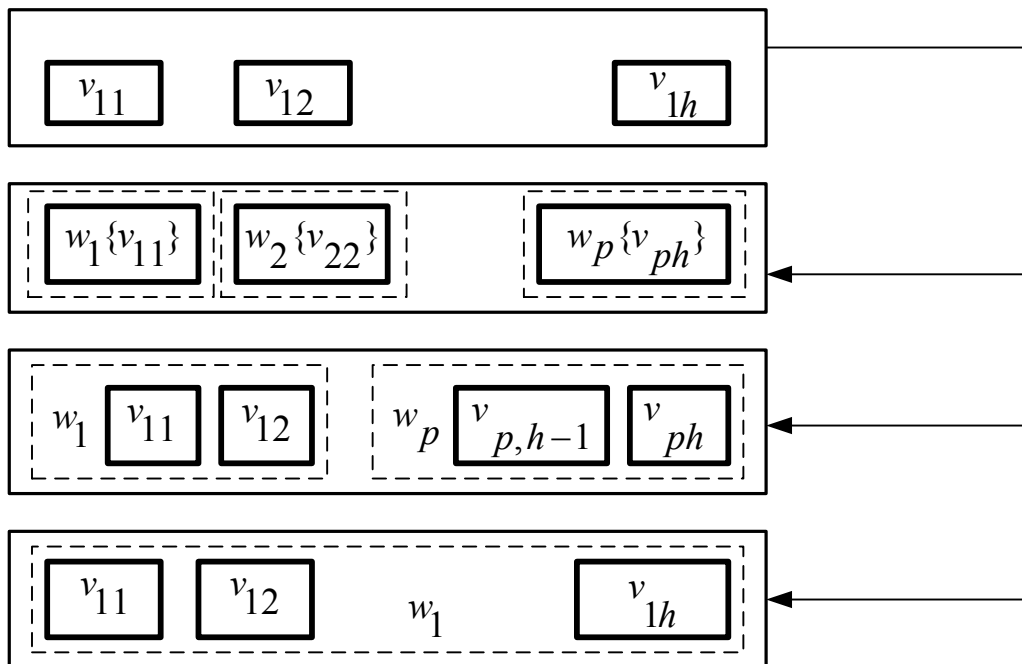
На основании этого в работе был разработан алгоритм дифференциации и синтеза ТО, позволяющий получать множество АТП.

При разработке множества АТП в качестве основы используется готовый ТП, разработанный с использованием САПР ТП, с его планом обработки и попереходной технологией.

Для анализа ТП и возможности его дифференциации и синтеза была предложена структурная формула операции в виде  $k$ -й попереходной последовательности  $L_j^{wk}$  для  $j$ -й операции

$$(L_j^{wk}) : \{ \{ v_{ij1}(l_1, \dots, l_n, d_1, \dots, d_n), \dots, v_{ijp}(l_{n+1}, \dots, l_q, d_{n+1}, \dots, d_q) \}, \dots, \{ v_{ijh_j}(l_{q+1}, \dots, l_{p_{h_j}}, \dots, d_{q+1}, \dots, d_{\bar{a}_{h_j}}) \} \} \quad (23)$$

где  $h_j$  – количество переходов на  $j$ -й операции;  $p_{h_j}$  – количество длиновых размеров, получаемых на  $h_j$ -м переходе;  $\bar{a}_{h_j}$  – количество диаметральных технологических размеров, получаемых на  $h_j$ -м переходе;  $l_k$  –  $k$ -й длиновой



технологический размер на переходе;  $\bar{a}_k$  –  $k$ -й диаметральный технологический размер на переходе.

Синтез любой операционной последовательности  $L_j^{wk}$  возможен в том случае, если исходя из анализа плана обработки и попереходной технологии определены матрица предшествования переходов

$$T_{d_i}^{\Pi} \left[ t_{v_{l,n}}^{\Pi} \in \{0,1,-1\} \right], \quad l, n \in h_i \quad (24)$$

и матрица возможности совмещения переходов в пределах одной операции

$$T_{d_i}^C \left[ t_{v_{l,n}}^C \in \{0,1\} \right], \quad l, n \in h_i; \quad d_i \{i \in M\}. \quad (25)$$

В основе построения матриц (24) и (25) отражены такие правила проектирования технологических операций как: ограничение по последовательности выполнения переходов, обусловленное логическим порядком обработки поверхностей; необходимость смены технологических баз; необходимость обработки нескольких поверхностей с одной установки; невозможность объединения в операцию переходов, отличающихся своей физической сущностью и методами формообразования на существующем оборудовании и др.

Для формирования множества АТП был разработан алгоритм, в котором возможность получения каждой операционной последовательности (23) проверялась с учетом матриц (24 – 25). Кроме того, проверялось – не нарушается ли план обработки АТП относительно базового варианта. При смене баз вносились погрешности переустановки детали и АТП проверялся с помощью размерного анализа. Алгоритм формирует каждую альтернативную операционную последовательность таким образом, что топология графов длиновых размеров и биений для АТП, относительно базового варианта ТП, остается без изменений.

Результаты исследования эффективности данного метода показали, что:

- в большинстве случаев для деталей общемашиностроительного применения возможно получение множества АТП без нарушения межоперационных размеров относительно базового варианта ТП (расчеты производились с помощью САПР ТП «ГАСПОТ – Экспресс» и системы автоматизированного расчета операционных размеров «САРОР»);
- для экономической оценки эффективности расписания с АТП наиболее целесообразным является критерий минимума стоимости расписания, предложенный Е. Б. Фроловым;
- множество АТП может содержать, в зависимости от множества технологического оборудования, ТП с различной степенью дифференциации. При этом возможно получение как дифференцированных вариантов, так и вариантов с концентрацией операций. Во многих случаях также возможно получение вариантов АТП с тем же количеством операций, как и для базового варианта ТП, но с иным распределением переходов между операциями.

При составлении расписаний в системах ОКП при использовании данного метода каждая деталь представлялась множеством АТП, но в результате построения расписания выбирался тот вариант ТП, который на конкретный

момент обеспечивал оптимум функционала всей производственной системы. Таким образом, использование данного метода позволяет согласовать функциональные системы САПР ТП и ОКП по общим критериям производства, повысить управляемость технологическими процессами во времени. В ряде случаев данный метод формирования АТП может быть использован при адаптации ТП под существующий парк оборудования в случаях передачи технологий между предприятиями.

**В шестой главе** были рассмотрены вопросы определения надежности расписаний в ОКП с учетом стохастичности процессов в АС, разработаны методы оценки расписаний с помощью моделей систем массового обслуживания (СМО) и метод оптимизации структуры АС.

Стохастичность процессов в расписаниях моделей ОКП далеко не всегда может быть выражена в явном виде по причине того, что расписания работы оборудования обязаны иметь номинальный характер и выражаться через моменты начала и окончания основных и вспомогательных операций.

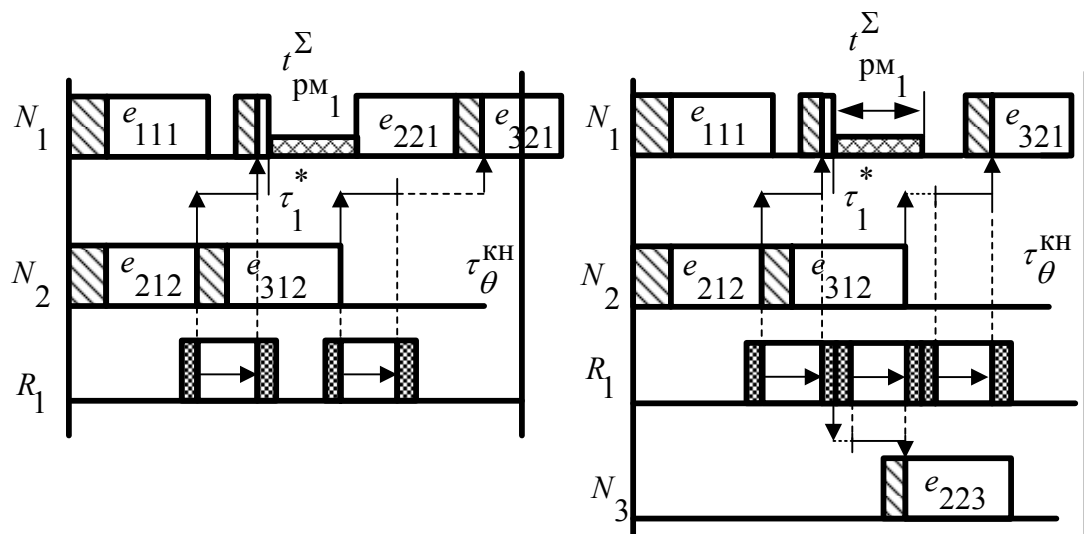
В работе был предложен комплексный метод, позволяющий оценивать надежность расписаний с учетом стохастических факторов и оптимизировать структуру АС с учетом выполнимости расписаний.

Для этого был разработан алгоритм определения надежности расписаний, в котором для АС на множествах двух классов ОУ – множествах ГПМ  $N = \{n\}$  и ТС  $R = \{r\}$  автоматически определялось количество состояний  $g$ , строился граф состояний и с помощью уравнений Колмогорова, на статистических параметрах интенсивностей отказов ОУ и окончания их ремонтов, определялись финальные вероятности  $p_j$ . В дальнейшем для любого объекта в АС, в зависимости от  $p_j$  и фонда времени  $\Phi_k$ , определялась величина времени  $t_{\text{PM}_k}^{\Sigma}$ , в течение которого  $k$ -е ОУ проведет в нерабочем состоянии – состоянии ремонта в момент отказа  $\tau_k^*$ . Далее определялось – какие последствия может оказать пребывание какого-либо ОУ в состоянии вынужденного простоя на расписание в целом. В ряде случаев нарушаются условия по длительности горизонта планирования  $\theta$  (рис. 6).

Рис. 6. Определение надежности расписаний

В соответствии с этим был разработан метод анализа надежности расписаний при условии его выполнения в рамках заданных моментов окончания  $\tau_{\theta}^{\text{КН}}$  на горизонте планирования, позволяющий определить наиболее критические моменты времени, состав и количество дублирующего оборудования, необходимого для выполнения производственных заданий.

В ряде случаев выполнимость расписаний может быть прогнозируема на этапе структурной оптимизации компоновок АС. Данная задача решалась с помощью теории массового обслуживания. При этом АС была представлена в виде модели двух взаимосвязанных  $n$ -канальных систем массового обслуживания (СМО) «СМО1 : ГПМ – ТС» и «СМО2 : СС – ТС», где ТС



являлись общим элементом обеих систем. В основу решения был положен известный, при управлении сложными системами, принцип ограничения длин очередей для лимитирующих ОУ –  $0 \leq L_{\text{оч}} < 1$ .

На известных временах обработки номенклатуры деталей  $M$ , параметрах производительности ОУ, с учетом определенных ранее финальных вероятностей отказов, определялись интенсивности обслуживания заявок различными классами ОУ и приведенные интенсивности потоков заявок, через которые в дальнейшем были выражены длины очередей для СМО1 и СМО2 для требуемого случая  $L_{\text{оч}_i} < 1, i \in \{\text{СМО1}, \text{СМО2}\}$ . Решение задачи выполнимости расписания при анализе очередей для СМО1 и СМО2 имеет три частных случая

$$1) L_{\text{оч}_1} > 1, L_{\text{оч}_2} < 1; \quad 2) L_{\text{оч}_1} < 1, L_{\text{оч}_2} > 1; \quad 3) L_{\text{оч}_1} > 1, L_{\text{оч}_2} > 1. \quad (26)$$

Для данных вариантов были предложены математические модели, позволяющие определять минимальное количество требуемых ОУ в АС, а также модель оптимизации состава множеств  $R\{r\}$  и  $S\{s\}$  при заданном значении  $N\{n\}$ . Данный метод может использоваться при любой степени

точности моделей планирования в системах ОКП, а также на проектной стадии формирования структуры АС.

Для решения разработанных задач определения надежности расписаний и оптимизации состава и структуры АС с целью выполнимости расписаний были разработаны соответствующие алгоритмы и программное обеспечение в составе системы ОКП.

**В седьмой главе** представлены структура системы ОКП и программного комплекса, как реализация предложенных выше методов по разработке системы ОКП, результаты апробации и численных экспериментов, а также рекомендации по использованию разработанных методов планирования и программного обеспечения.

На основании результатов исследования, предложенных комплексных и частных математических моделей формирования расписаний, был разработан пилотный проект системы ОКП для машиностроительного производства PolyPlan, относящийся к классу MES-систем. Данная система, функционирующая в среде Windows 98/ME/NT/XP, является комплексным инструментом формирования расписаний работы различных классов ОУ в АС, а также инструментом моделирования расписаний, оценки их надежности и оптимизации структуры АС, включает в себя технологическую подготовку производства, модули объемного и детализированного планирования, развитую систему диспетчирования, интерфейсы интеграции с существующими системами САПР ТП/АСТПП.

Разработана двухуровневая система интеграции данной системы ОКП с существующими серийными системами САПР ТП/АСТПП «Вертикаль», «PLM: ЛОЦМАН» (АСКОН, РФ). Совместная разработка спецификаций верхнего уровня интеграции позволила объединить задачи АСТПП и ОКП и, тем самым, сократить объем технологической подготовки производства в рамках предприятия.

В результате моделирования расписаний для АС было доказано, что для производств с требованиями составления расписаний для вспомогательных устройств (ТС, СС, бригады наладчиков) традиционные подходы составления расписаний являются неприменимыми. Использование предложенных методов учета различных классов ОУ в разработанной системе ОКП позволило построить оптимальные расписания с учетом как основного технологического оборудования, так и с учетом вспомогательных ОУ.

Были разработаны рекомендации по использованию системы PolyPlan, формированию номенклатуры запусков изделий. Выявлены области наиболее эффективного использования тех или иных частных критериев при различных параметрах входной номенклатуры деталей, разработаны рекомендации и методики по выбору векторных критериев с учетом анализа совместимости и противоречивости частных критериев.

Результаты построения расписаний для различных предприятий показали наличие существенных резервов повышения эффективности использования

дорогостоящего парка оборудования (на 15 – 20%) и снижения объемов незавершенного производства (на 10 – 12%), позволили оптимизировать работу вспомогательных устройств и сократить их количество. Для автоматизированных и гибких производственных систем эти показатели могут быть повышены, в среднем, на 20% относительно достигнутых. Показано, что чем больше коэффициент альтернативности номенклатуры запусков, тем выше эффективность использования парка технологического оборудования.

Результаты исследований в области сокращения переналадок при построении расписаний как в рамках данной работы, так и проведенные автором ранее показали, что использование предложенного метода определения состава и длительности операций переналадок оборудования для случая автоматизированного производства, – в случае использования ГПМ, позволяет не только повысить информативность производства, но также существенно сократить состав и длительность операций переналадок, по сравнению с традиционными методами, на 20 – 25% в среднем.

Результаты исследований и разработанные комплексные математические модели были внедрены и приняты к внедрению на ОАО «УМПО» при адаптации и реинжиниринге системы ОКП производственного модуля ВААН V, на ОАО «Стерлитамак-М.Т.Е.» при создании системы управления жизненным циклом производства современного металлорежущего оборудования, в ФГУП «Гидравлика», в учебном процессе Уфимского государственного авиационного технического университета в рамках дисциплины «Автоматизация технологических процессов и производств» по направлениям 220200 «Автоматизация и управление» и 220300 «Автоматизированные технологии и производства», а также в курсовом и дипломном проектировании.

Результаты использования предложенных автором методов, математических моделей и системы ОКП PolyPlan показали эффективность предлагаемых подходов к созданию систем ОКП для автоматизированных производств с мелкосерийным и единичным характером выпуска изделий.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В работе решена актуальная, имеющая важное народно-хозяйственное значение проблема, состоящая в создании системы оперативно-календарного планирования на основе комплексных моделей для автоматизированных механообрабатывающих мелкосерийных и единичных производств, обеспечивающих повышение их эффективности.

При решении этой проблемы получены следующие результаты:

1. Разработана структура системы ОКП с возможностями оперативного синтеза модели планирования в зависимости от условий производства.

Предложенный в работе принцип организации структуры системы ОКП, включающей в себя различные функциональные модули, позволяет интегрировать системы ОКП, САПР ТП/АСТПП, диспетчирования и управления в рамках общей системы управления предприятием. Данный подход позволяет унифицировать структуру систем ОКП и сократить затраты на их адаптацию на предприятиях при использовании различных систем управления предприятиями.

2. Разработан комплексный метод анализа и формирования оптимального множества номенклатуры деталей на различных стадиях планирования. Показано, что решение данной задачи представляет собой комплексную задачу уточнения информации по планированию и формированию номенклатуры деталей в виде ряда математических моделей, позволяющих на различных этапах планирования использовать различные по степени адекватности способы представления данных и модели с различным составом критериев. Разработанные предварительные модели планирования позволяют формировать расписания для различных обслуживающих устройств, что повышает точность расписаний. Предложенная имитационная модель АС позволяет формировать многополюсные сети Петри различной размерности и сложности, что позволяет решать задачи имитационного моделирования для АС с большим количеством и разнообразием объектов и их состояний.

3. Разработаны методы формализации временных параметров расписаний различных обслуживающих устройств в автоматизированном производстве. Многие из этих параметров впервые представлены в виде аналитических временных зависимостей с учетом технологических, структурно-компоновочных и организационных особенностей обслуживания заявок. Использование данных методов формализации параметров расписаний в моделях ОКП дает возможность значительно повысить информативность и точность формируемых расписаний работы оборудования автоматизированных производственных систем.

4. Разработана комплексная модель ОКП с учетом влияния структурно-компоновочных и организационно-технологических параметров обслуживающих устройств. Особенность данной модели, построенной по блочно-модульному принципу, включающей в себя блоки критериев, основных параметров номенклатуры деталей и функциональные блоки различных обслуживающих устройств, заключается в том, что появляется возможность создавать, в зависимости от конкретных производственных условий, различные по адекватности частные модели, в том числе модели межцеховых расписаний и для единичных производств. Данный подход позволил разработать алгоритм автоматизации синтеза моделей планирования. При этом установлена закономерность построения математических моделей ОКП, которая заключается в том, что на основе базовой модели с одним классом обслуживающих устройств – технологического оборудования, методом рекурсии с параметром дополнительного класса вспомогательных обслуживающих устройств, возможно построение модели, адекватной

соответствующему уровню автоматизации конкретной производственной системы. Любая частная модель может быть получена за счет релаксации комплексной модели. Предложенные автором методы многокритериальной оптимизации позволяют решать задачи выбора оптимального векторного критерия как для случаев применения весовых коэффициентов, так и на Парето-оптимальных множествах.

5. Разработан метод управления технологическими процессами в системе ОКП на основе их структурной оптимизации. Разработанный для этого метод дифференциации и последующего синтеза технологических операций на базе исходной технологии, представляемой САПР ТП, позволяет получать множество альтернативных вариантов ТП детали с неизменными параметрами качества и точности. Использование множества альтернативных ТП деталей на этапе их планирования и изготовления обуславливает повышение эффективности функционирования АС, а также адаптацию ТП в плане его переносимости на различные производственные системы с различным составом оборудования. Предложенный метод впервые позволил связать разрозненные ранее задачи проектирования и управления технологическими процессами во времени и его использование позволяет повысить гибкость планирования, технологического проектирования и снизить затраты на подготовку производства.

6. Разработаны комплексные методы оценки надежности расписаний работы АС в системе ОКП с учетом стохастичности процессов. Использование предложенных методов позволяет на различных стадиях планирования оценить напряженность и выполнимость формируемых расписаний, имеющих номинальный характер. Предложенные методы позволяют определять конкретные мероприятия для устранения причин невыполнения расписаний в установленные сроки. Предложен метод оценки и оптимизации структуры и состава автоматизированной производственной системы с точки зрения минимизации времен простоев вследствие возникающих очередей обслуживания для различных объектов.

7. Разработана и внедрена автоматизированная система ОКП PolyPlan для АС в виде комплекса ПО, относящаяся к классу MES-систем, являющаяся действенным инструментом повышения эффективности и сокращения непроизводительных затрат ресурсов предприятий. Использование данной системы позволило расширить функциональность задач ОКП при реинжиниринге ERP-системы, решить задачи оптимизации управления жизненным циклом изделий, повысить эффективность парка оборудования на 15 – 20%, снизить объемы незавершенного производства на 10 – 12% для ряда машиностроительных предприятий, оптимизировать работу парка дорогостоящего оборудования.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

*Публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК:*



1. Повышение производительности ГПС путем оптимизации расписаний / Н. М. Султан-заде, Р. Р. Загидуллин // М., СТИН. 1996. № 12. С. 9–13. (автору принадлежит 2,5 ж. стр.).
2. Определение числа транспортных средств в ГПК механической обработки / Р. Р. Загидуллин // М., СТИН. 1998. № 6. С. 13–16. (автору принадлежит 4 ж. стр.).
3. Комплексная математическая модель оперативно-календарного планирования в гибких комплексах механической обработки / Р. Р. Загидуллин // М., Автоматизация и современные технологии. 1999. № 9. С.32–34. (автору принадлежит 3 ж. стр.).
4. Проектирование и планирование технологических процессов в ГПС на базе дифференциации операций / Р. Р. Загидуллин // М., СТИН. 2002. № 6. С. 15–19. (автору принадлежит 5 ж. стр.).
5. К определению точности расписаний работы оборудования в гибких производственных системах / Р. Р. Загидуллин // М., Автоматизация и современные технологии. 2003. № 8. С.21–24. (автору принадлежит 4 ж. стр.).
6. Оценка выполнимости расписаний и оптимизация структуры гибких производственных систем / Р. Р. Загидуллин, В. Ц. Зориктуев // М., Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 1 С.45–48. (автору принадлежит 2 ж. стр.).
7. Имитационная модель формирования расписаний в ГПС / Р. Р. Загидуллин // М., Информационные технологии. 2004. № 3. С.20–24. (автору принадлежит 5 ж. стр.).
8. Предварительная модель планирования работ в гибких производственных системах / Р. Р. Загидуллин, В. Ц. Зориктуев // М., Известия вузов. Машиностроение. 2004. № 6. С.67–68. (автору принадлежит 1 ж. стр.).
9. Имитационные модели для формирования расписаний в гибких производственных системах / Р. Р. Загидуллин // М., Технология машиностроения. 2004. № 3. С.52–55. (автору принадлежит 4 ж. стр.).
10. Построение моделей межцеховых расписаний в подсистемах оперативно-календарного планирования автоматизированных производств / Р. Р. Загидуллин // М., СТИН. 2004. № 8. С.3–8. (автору принадлежит 6 ж. стр.).
11. Вопросы интеграции систем управления класса ERP в CALS-проектах на машиностроительных предприятиях / Р. Р. Загидуллин, В. Ц. Зориктуев // М., Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 11. С.54–56. (автору принадлежит 1,5 ж. стр.).
12. Формирование портфеля заказов машиностроительного предприятия / Р. Р. Загидуллин // М., Технология машиностроения. 2005. № 1. С.81–84. (автору принадлежит 4 ж. стр.).
13. Структура системы оперативно-календарного планирования в гибких производственных системах / Р. Р. Загидуллин // М., Автоматизация и современные технологии. 2005. № 2. С. 44–46. (автору принадлежит 3 ж. стр.).

14. Математическая модель оперативно-календарного планирования для единичного производства / Р. Р. Загидуллин // М., Технология машиностроения. 2005. № 3. С. 73–76. (автору принадлежит 4 ж. стр.).

15. Формирование математических моделей оперативно-календарного планирования в ГПС / Р. Р. Загидуллин // М., СТИН. 2005. № 4. С. 3–7. (автору принадлежит 5 ж. стр.).

16. Комплексный подход к построению моделей систем оперативно-календарного планирования в машиностроении / Р. Р. Загидуллин // М., Информационные технологии. 2005. № 5. С. 43–47. (автору принадлежит 5 ж. стр.).

17. Математическая модель предварительного назначения работ в гибких производственных системах механической обработки / Р. Р. Загидуллин // Вестник УГАТУ. Уфа, 2005. Т.6. № 1 (12). С. 95–97. (автору принадлежит 3 ж. стр.).

18. Вопросы оперативно-календарного планирования и управления в машиностроении / Р. Р. Загидуллин, В. Ц. Зориктуев // М., Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 8. С. 49–55. (автору принадлежит 3,5 ж. стр.).

19. Российские MES-системы или как вернуть производству оптимизм / Ю. Р. Гараева, Р. Р. Загидуллин, Сун Кай Цинн // М., САПР и Графика. 2005. № 11. С. 20–24. (автору принадлежит 1,5 ж. стр.).

20. Вопросы синтеза математических моделей оперативно-календарного планирования / Р. Р. Загидуллин // М., Технология Машиностроения. 2006. № 1. С. 76–78. (автору принадлежит 3 ж. стр.).

21. Анализ и синтез компоновок гибких производственных комплексов / Р. Р. Загидуллин, Р. М. Мухтаров, А. М. Шамсутдинов // М., Технология машиностроения. 2006. № 3. С. 65–67. (автору принадлежит 1 ж. стр.).

#### ***Монография:***

22. Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах / Р. Р. Загидуллин / под. ред. В. Ц. Зориктуева. М., МАИ. 2004. 208 с.

#### ***Учебное пособие:***

23. Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах: Учебное пособие для вузов (гриф УМО АМ) / В. Ц. Зориктуев, Р. Р. Загидуллин // Уфа, УГАТУ. 2004. 106 с.

#### ***Другие публикации:***

24. Задача оптимизации назначения номенклатуры деталей в ГПС / Н. М. Султан-заде, Р. Р. Загидуллин // Логическое управление с использованием ЭВМ / Сб. материалов XI Всесоюз. симп. М.: Науч. совет АН СССР по комплексной проблеме «Кибернетика». 1988. С. 331–334.

25. Автоматизация проектирования технологических процессов в гибких производственных комплексах / Р. Р. Загидуллин // Автоматизированные технологические и мехатронные системы в машиностроении: Сб. науч. тр. / Под ред. В. Ц. Зориктуева. Уфа : УГАТУ. 1997. 164 с., С. 32–35.

26. Комплексный анализ схем обслуживания заявок в расписаниях гибких производственных систем / Р. Р. Загидуллин // Оптимальное управление мехатронными станочными системами : сб. науч. тр. Уфа : УГАТУ. 1999. С. 94–97.

27. Надежность расписаний работы оборудования в ГПС / Загидуллин Р. Р. // Интеллектуальные мехатронные станочные системы : сб. науч. тр. Уфа : РИО БашГУ. 2003. С. 159–166.

28. Имитационная модель гибкой производственной системы / Р. Р. Загидуллин // Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках : сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. Т.2. С.-Пб. 2003. С. 51 – 54.

29. Имитационное моделирование гибких производственных систем / Р. Р. Загидуллин // Информационные технологии и системы : Новые информационные технологии в науке, образовании, экономике : сб. тр. междунар. конф. Владикавказ : ВНЦ РАН. 2003. Т. 2. С. 380–384.

30. Оптимизация структуры гибких производственных систем / Р. Р. Загидуллин, Е. В. Селиванова // Информационные технологии и системы: Новые информационные технологии в науке, образовании, экономике : сб. тр. междунар. конф. Владикавказ : ВНЦ РАН. 2003. Т. 2. С. 384–387.

31. Модульная структура систем оперативно-календарного планирования / Р. Р. Загидуллин // Материалы и технологии XXI века : сб. статей II междунар. науч.-техн. конфер. Пенза: ПДЗ. 2004. С. 162–165.

32. Математическая модель формирования предварительных назначений в задачах составления расписаний / Р. Р. Загидуллин // Информационные модели экономики : сб. тр. второй всерос. науч.-практ. конф. М. : МГАПИ. 2004. С. 14–18.

33. Оптимизация групповых расписаний работ в экономико-математических моделях оперативно-календарного планирования / Р. Р. Загидуллин // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании : сб. статей XIII Междунар. НТК. Пенза : ПДЗ. 2004. 446 с., С. 30–32.

34. Анализ требований к системам оперативно-календарного планирования для машиностроения / Р. Р. Загидуллин // Формирование механизма экономического роста в Российской Федерации и Республике Башкортостан в координатах мирового развития : матер. всерос. науч.-практ. конф. Уфа: УГИС. 2004. Часть 2. С. 274–277.

35. Требования к системам оперативно-календарного планирования в составе систем управления предприятиями класса ERP / Р. Р. Загидуллин, В. Ц. Зориктуев // Татищевские чтения. Информационные системы и технологии в управлении и организации производства : матер. междунар. науч. конфер. Тольятти : 2004. С.310–313.

36. Использование нерегулярных партий запусков в моделях оперативно-календарного планирования / Р. Р. Загидуллин // Оптимизация и

управление процессом резания, мехатронные станочные системы : сб. тр. междунар. НТК. Уфа: РИО БашГУ. 2004. С. 123–129.

37. Решение задач многокритериальной оптимизации с неопределенным назначением весовых коэффициентов / Р. Р. Загидуллин // Авиационно-технологические системы : межвуз. сб. науч. тр. /под общ. ред. М. А. Анферова. Уфа : УГАТУ. 2004. С.24–27.

38. Вопросы реинжиниринга моделей оперативно-календарного планирования в системах класса ERP / Р. Р. Загидуллин, В. Ц. Зориктуев // Современные наукоемкие технологии в промышленности России : высокопроизводительные вычисления и CALS-технологии : сб. док. науч.-техн. совещ. Уфа : УГАТУ. 2005. С. 219–226.

39. Вопросы оперативно-календарного планирования в автоматизированном производстве / В. Ц. Зориктуев, Р. Р. Загидуллин // Конструкторско-технологическая информатика 2005. : тр. 5-й междунар. конгр.. М. : ИЦ ГОУ МГТУ «Станкин». 2005. С. 260–264.

40. Синтез математических моделей оперативно-календарного планирования / Р. Р. Загидуллин // Мехатроника, автоматизация, управление. 2-я всерос. НТК с междунар. участием. : сб. трудов, Т. 1. Уфа : УГАТУ. 2005. С. 324–328.

Диссертант

Р. Р. Загидуллин

ЗАГИДУЛЛИН Равиль Рустэм-бекович

Система оперативно-календарного планирования  
автоматизированного механообрабатывающего  
мелкосерийного производства  
на основе комплексных моделей

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Подписано к печати . Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Печать плоская.

Усл.печ.л. 2,0. Усл.кр.-отт. 2,0. Уч.-изд.л.1,9

Тираж 100 экз. Заказ №

ГОУВПО «Уфимский государственный авиационный технический  
университет»

Центр оперативной полиграфии

450000, г.Уфа, ул. К. Маркса, 12