

ГРОМОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ АДАПТАЦИИ И
ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММНЫХ АГЕНТОВ**

Специальности: 05.02.22 – Организация производства (машиностроение)
05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Тарасов Валерий Борисович

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Афонин Павел Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Захаров Михаил Николаевич

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1988017

Гронов С.А. Разработка моде

ведущая организация:

-018

кандидат технических наук, доцент
Гладков Леонид Анатольевич

Российский научно-исследовательский
институт информационных технологий
и систем автоматизированного
проектирования

Защита состоится «19» сентября 2012г. в _____ часов на
заседании диссертационного совета Д.212.141.05 Московского
государственного технического университета им.Н.Э.Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный
печатью просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Телефон для справок (499)2670963

Автореферат разослан «16» сентября 2011г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.141.05

к.т.н., доцент

Силаева Л.А.

Актуальность. Планирование является неотъемлемой частью организации современного машиностроительного производства. Здесь наблюдаются две противоположные тенденции: с одной стороны для массового производства характерна некоторая предопределенность, выраженная узкой специализацией и крупными партиями выпускаемых изделий, а с другой стороны, в условиях труднопредсказуемого рынка и изменчивости спроса, наблюдается индивидуализация требований заказчиков и снижение объемов заказываемых партий. Наиболее остро это противоречие выражается на уровне оперативного планирования производства, которое должно обеспечивать эффективное управление в динамичных условиях. Таким образом, сотрудникам планово-диспетчерских служб, осуществляющим разработку оперативных планов, становится все труднее исполнять свои обязанности. Средством решения этих проблем является использование информационных систем. Среди них наибольшую популярность приобрели системы MRP/ERP, охватывающие существенный объем задач планирования и управления ресурсами производственного предприятия. Кроме того используются специализированные приложения, такие как производственные исполнительные системы MES (Manufacturing Execution System) и системы оптимизированного (синхронного) планирования APS (Advanced Planning & Scheduling). Сегодня широко освещены примеры успешного внедрения этих систем на площадках массовых производств различных отраслей. Однако опыт показывает, что далеко не всегда можно применить существующее на рынке тиражное решение в реальной жизни. Прежде всего, проблемы, связанные с внедрением того или иного программного приложения, обусловлены производственной спецификой отрасли, а подчас и особенностями конкретного предприятия. Игнорирование этих особенностей или же заведомое упрощение модели процесса приводит к формированию плана, невыполнимого в реальных производственных условиях, что в свою очередь сводит на нет результаты, полученные при помощи средств автоматизации. В целом, уровень оперативного планирования играет ключевую роль в организации производства, непосредственно определяя сценарий работы производящих цехов.

Таким образом, разработка методов и средств автоматизированного планирования массовых производств остается весьма актуальной проблемой. В диссертационной работе предложено новое решение задачи оперативного планирования производства на основе современных интеллектуальных технологий.

Объектом исследования являются сложные производственные системы оперативного планирования, рассматриваемые в плане сокращения времени подготовки плана и повышения его качества.

Предмет исследования составляют методы и модели планирования производства с учетом ограничений, разрабатываемые на основе теории коллективной адаптации и многоагентных технологий.

Целью работы является повышение эффективности оперативного планирования производства за счет разработки моделей, алгоритмов и программных средств автоматизированного планирования.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Обзор существующих подходов к производственному планированию в современных информационных системах класса ERP, MES, APS. Определение проблем их промышленного использования.
2. Анализ типовых формулировок задач оперативного планирования производства.
3. Математическая постановка задачи построения и оптимизации производственного расписания. Обзор методов ее решения.
4. Формализация задачи детального планирования, как системы адаптации программных агентов. Разработка методов взаимодействия агентов.
5. Разработка гибридного алгоритма эвристического поиска в пространстве состояний на основе предложенной многоагентной модели и модифицированного генетического алгоритма.
6. Программная реализация разработанных алгоритмов.
7. Оценка эффективности использования разработанных методов для прикладной задачи планирования поточных линий в промышленных условиях.

Методы исследования. При выполнении диссертации использованы методы системного анализа и исследования операций, математического программирования и теории расписаний, теории алгоритмов и теории графов, теории программных агентов и многоагентных систем, теории адаптации и коллективного поведения, эволюционного моделирования и генетического поиска, аппарат теории вероятностей и нечетких множеств.

Среди работ в области исследования операций, планирования производства и теории расписаний следует отметить основополагающие труды таких ученых как: Х.Ахьюджа, Г.Вагнер, Д.Джонсон, М.Гэри, Дж.Р.Джексон, М.Н.Захаров, Р.Конвей, А.Кофман, А.А.Колобов, Б.А.Лагоша, А.А.Лазарев, В.Г.Митрофанов, И.Н.Омельченко, М.Л.Пинедо, Г.С.Поспелов, Д.А.Поспелов, Л.И.Смоляр, В.Л.Сосонкин, В.С.Танаев, Е.Б.Фролов, Е.Н.Хоботов, В.В.Шкурба, С.Элмаграби. При разработке методов и алгоритмов планирования на основе подходов искусственного интеллекта автор опирался на публикации ведущих отечественных и зарубежных специалистов по эволюционному моделированию и генетическим алгоритмам (Дж.Холланд, Л.Дэйвис, Д.Голдберг, Д.Фогель, Д.И.Батищев, И.Л.Букатова, В.В.Емельянов, В.М.Курейчик, Б.К.Лебедев, И.П.Норенков), труды родоначальников теории искусственных агентов, коллективного поведения и многоагентных систем (К.Хьюитт, М.Л.Цетлин) и работы других известных ученых в этой области (М.Вулдридж, В.И.Городецкий, И.Демазо, Н.Дженнингс, К.Лэнгтон, К.Мазс, Ж.Фербе, В.Г.Редько, Р.Саттон, П.О.Скобелев, Л.А.Станкевич, В.Б.Тарасов, В.Ф.Хорошевский).

Научная новизна исследования определяется в первую очередь разработкой методов и моделей, расширяющих возможности систем планирования в контексте формализации экспертных правил, позволяющих учитывать специфику технологических и производственных процессов, на основе технологии программных агентов и методов их обучения. Предложен и разработан оригинальный метод адаптивного планирования загрузки поточных

линий, обеспечивающий формирование производственного расписания при удовлетворении различных технологических требований. Метод обучения с подкреплением применен для коллектива искусственных агентов, реализованных с использованием концепции анимата. Разработана схема каскадного разрешения ресурсных конфликтов и нарушений ограничений в процессе адаптивного поиска. Введены и реализованы специализированные операторы генетического поиска, учитывающие специфику задачи планирования. Предложен гибридный алгоритм, сочетающий подходы многоагентных технологий и генетического поиска, на основе которого построена система организационного управления, реализующая принцип упреждения потенциальных срывов исполнения запланированных заданий.

Результаты работы получены в ходе выполнения проектов РФФИ №03-07-90012, 07-07-00418, 08-07-00337, 08-07-00337, 11-07-00780, 11-07-13165-офи-м-2011-РЖД.

Практическая ценность. Предложенные методы и модели реализованы в виде программ на ЭВМ на языке программирования ANSI C++ с использованием библиотеки STL. Разработанные методы позволяют формировать оперативный план производства с учетом цеховых ограничений. Созданный программный инструментарий позволяет существенно сократить время составления плана, а также обеспечивает возможность его быстрой корректировки. Реализованный программный комплекс интегрирован с ERP-системой ORACLE e-Business Suite, с информационной системой 1C 7.7 и использован при автоматизации бизнес-процессов оперативного планирования производства. Архитектура предложенного решения поддерживает большинство промышленных платформ: UNIX, Linux, WIN NT, а также позволяет осуществлять интеграцию с прочими информационными системами.

Внедрение и реализация результатов. Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, были внедрены на отечественных предприятиях ОАО «Лебедянский», ЗАО НПО «Тяжпромарматура» и ЗАО «ФМРус», а также использованы в учебном процессе кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается результатами вычислительных экспериментов на тестовых и практических задачах, а также актами о внедрении.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2002г.), Научной сессии МИФИ-2002 (Москва, 2002г.), II-м Международном научно-практическом семинаре «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (Коломна, 2003г.), Международных научно-технических конференциях IEEE AIS'03 и CAD-2003 (Дивноморское, 2003г.), Международных научно-технических конференциях IEEE AIS'04 и CAD-2004 (Дивноморское, 2004г.), III-м Международном научно-практическом семинаре «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». (Коломна, 2005г.), практическом семинаре «Решения ORACLE для пищевой промышленности» (Москва, 2007г.), IV-й Международной научно-практической конференции

«Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». (Коломна, 2007г.), VI-й Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». (Коломна, 2011г.), а также на Всероссийской конференции «Эффективные методы автоматизации технологической подготовки и планирования производства» (Москва, 2011г.)

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 15 работ, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 161 наименование, и 2 приложений. Объем основного текста работы составляет 155 страниц, включая 34 рисунка и 14 таблиц. Полный объем диссертации составляет 181 страницу.

На защиту выносятся:

1. Модель адаптивного планирования, позволяющая учитывать цеховые ограничения в процессе формирования оперативного плана производства.
2. Схема каскадного разрешения ресурсных конфликтов и нарушения ограничений в ходе адаптивного построения производственного расписания.
3. Модифицированные генетические операторы кроссинговера и мутации, снабженные экспертными правилами, которые обеспечивают удовлетворение организационно-технологических ограничений.
4. Гибридный алгоритм оперативного планирования, сочетающий подходы многоагентных технологий и эволюционного поиска.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель исследования, основные научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о практической ценности, реализации и внедрении диссертации.

В первой главе сделан обзор состояния рассматриваемой проблемы и дана постановка задач исследования.

В настоящее время промышленные предприятия, находящиеся в условиях жесткой конкуренции, производят изменения системы управления в соответствии с принципом ее ориентации на клиента. Такое положение дел сопровождается следующим перечнем противоречивых факторов, усложняющих организацию производства и управление бизнесом: уменьшение сроков исполнения заказов, рост числа заказчиков, разнообразие географии продаж и сегментов рынка, сокращение жизненного цикла изделия, расширение номенклатуры выпускаемых изделий, подчас с незначительными отклонениями, сокращение объема партии выпускаемых изделий.

Эти факторы существенно влияют на процессы оперативного планирования, определяющие сценарии работы производственных цехов. Соответственно, оперативное планирование должно быстро и адекватно реагировать на изменения конъюнктуры рынка. Автоматизация бизнес-процессов планирования давно стала нормой для современных промышленных

предприятий. Существуют различные классы информационных систем, реализующие современные методологии планирования производства в машиностроении. Наиболее известными являются MRP- и ERP-системы первого и второго поколений, а также недавно разработанные MES и APS-системы. На рис.1 представлен цикл планирования, используемый многими промышленными предприятиями. Здесь показано, какие функции цикла охватывают рассматриваемые классы информационных систем.

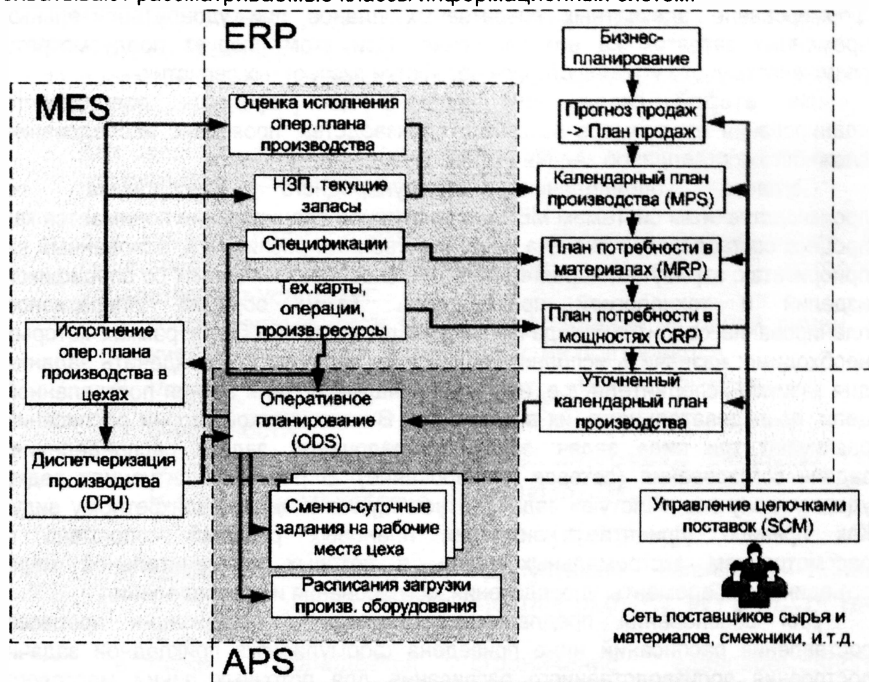


Рис.1. Системы производственного планирования

Исторически сложилось так, что вышеупомянутые системы, развиваясь каждая от своей традиционной области, сошлись на процессах оперативного планирования. Промышленная автоматизация этих процессов осложняется рядом специфических факторов. Сложность и уникальность задач оперативного планирования производства на цеховом уровне обусловлена набором индивидуальных ограничений, присущих конкретной отрасли, а зачастую спецификой производственных и технологических процессов отдельного предприятия. При этом далеко не всегда в моделях производства, заложенных в существующие программные решения, рассматривают ограничения технологического характера. Нередко использование типовых информационных систем планирования не удовлетворяет требованиям бизнеса по критерию временных затрат, требуемых на процесс составления плана.

Традиционно проблема составления оперативного плана на машиностроительных производствах решалась силами предметных

специалистов, сотрудников плановых и диспетчерских служб (плановиков). Имея многолетний опыт работы, они сформировали определенные правила и методы, позволяющие получать приемлемые варианты решения. Однако в этом случае невозможно выполнять быстрое перепланирование, необходимое для гибкого реагирования на изменение производственной или рыночной ситуации. Таким образом, для повышения эффективности процессов оперативного планирования требуется новый подход, обеспечивающий автоматизированное формирование адекватных оперативных планов при удовлетворительных временных затратах на его получение. При этом следует предусмотреть возможность учета и компьютерной обработки экспертных эвристик.

Во второй главе дана формализация процесса оперативного планирования на примере поточного производства, проведено исследование сложности поставленной задачи и обзор методов ее решения.

Согласно определению международного консорциума по производственным системам MESA, оперативное планирование понимается как процесс составления и расчета производственных расписаний, основанный на приоритетах, атрибутах, характеристиках и способах, связанных со спецификой изделий и технологией производства. Таким образом, оперативное планирование сводится к задачам теории расписаний (TP), в рамках которых необходимо: назначить исполнителя каждому заданию и упорядочить задания для каждого исполнителя, т.е. найти наилучшую, с точки зрения поставленной цели, последовательность их выполнения. В классической теории расписаний различают три вида задач: задачи упорядочения, задачи распределения, задачи согласования (сетевое планирование). В реальных ситуациях редко удается получить «чистую» задачу, относящуюся к одному конкретному виду. Как правило, принятие наилучших плановых решений сопряжено с рассмотрением экстремальных задач, в которых в значительной мере объединяются элементы упорядочения, согласования и распределения.

Для обоснования предлагаемого подхода к организации процесса составления расписаний ниже приведена формулировка прикладной задачи построения производственного расписания для поточных линий массового производства.

Дано:

1. Множество машин – производственных линий M , $|M|=m$, каждая линия характеризуется определенным перечнем параметров, значения которых накладывают дополнительные ограничения при определении работ. График недоступности производственных линий задает сервисные интервалы или ремонты $[sb_{ji}, se_{ji}]$, их границы обозначают соответственно начало и окончание i -го сервиса на j -й линии. Также известно RQ – общее количество технологической оснастки.

2. Конечное множество заданий N , $|N|=n$, каждое задание состоит из одной операции. Задание есть элементарная работа, подлежащая выполнению, оно характеризуется: номером машины m_i , $1 \leq m_i \leq m$; длительностью t_i , выраженной в часах; индивидуальным директивным сроком d_i , выраженным в часах; признаком необходимости использовать оснастку $rq_i \in \{0,1\}$.

Матрица инцидентности R определяет соотношение между заданиями и производственными линиями. Значение элемента матрицы r_{ij} отражает приоритет выбора j -й линии для выполнения i -го задания, $r_{ij} = \infty$, если i -е задание не производится на j -й линии.

Здесь WT -матрица переналадки линии задает вспомогательное время, требуемое на переход с выпуска i -го задания на j -е, причем $wt_{ij} \geq 0$.

Определить:

Разбиение $N = N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_m$ множества заданий N на m непересекающихся подмножеств, такое что:

- 1) распределение заданий по линиям соответствует матрице инцидентности R , т.е. $\forall m \in M, \forall i \in N_m$ имеем $r_{im} < \infty$;
- 2) для заданий осуществляется выбор предпочтительных линий, что соответствует критерию $\sum_{i \in N} r_{im} \rightarrow \min$;
- 3) для каждого подмножества N_m на горизонте планирования D существует расписание (упорядочение) $\sigma_m: N_m \rightarrow \{0, 1, \dots, D\}$, которое удовлетворяет условиям:
 - а. последовательности выполнения заданий на одной линии, с учетом требования переналадок, не повторяются,
 - б. $\forall n_{i+1} \in N_m \setminus n_i \Rightarrow \sigma_m(n_{i+1}) \geq \sigma_m(n_i) + t_i + wt_{i(i+1)}$, где σ_m – функция очередности;
 - с. не нарушается график сервисных интервалов m -й линии, т.е. $\forall n_i \in N_m$ имеем условия $\begin{cases} \sigma_m(n_i) \notin [sb_{ml}; se_{ml}] \\ \sigma_m(n_i) + t_i \notin [sb_{ml}; se_{ml}] \end{cases}$;
 - д. одновременно загружено допустимое количество линий $\forall \tau \in \{0, 1, \dots, D\}, \exists N' \subset N: \tau \in [\sigma_m(n_i); \sigma_m(n_i) + t_i], |N'| \leq m_{\max}$, где $m_{\max} \leq m$;
 - е. также соблюдается ограничение единовременного использования оснастки, $\forall \tau \in \{0, 1, \dots, D\}, N'_{RQ} \subset N': \forall n_i \in N'_{RQ}, tq_{ni} = 1, |N'_{RQ}| \leq RQ$.
- 4) Для всего расписания обеспечивается минимизация целевой функции (ЦФ) $F \rightarrow \min$, где F отражает количество заданий, для которых не выполнены индивидуальные директивные сроки, $F = \sum_i^N |\sigma(n_i) + t_i - d_i| \rightarrow \min$.

Решение представленной задачи невозможно получить, рассматривая и решая по отдельности задачу разбиения и задачи упорядочения на каждой из m производственных линий. К тому же, базовые задачи TP – упорядочение с минимальным запаздыванием и составление расписания для произвольного числа машин и заданий – являются NP-полными. Учитывая данное обстоятельство, в работе обоснована целесообразность применения современных подходов искусственного интеллекта, являющихся популярным направлением развития эвристических методов.

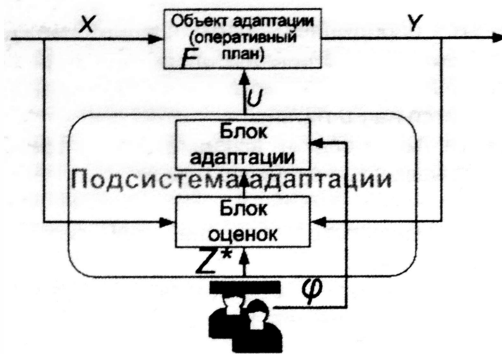


Рис.2. Планирование как система адаптации

диссертации в качестве новых компьютерных методов для решения задач ТР предложено использовать комбинацию методов эволюционного моделирования на основе генетических алгоритмов, а также методов адаптации программных агентов. Процесс планирования предлагается рассмотреть как процесс адаптации. Общая схема данного

подхода приведена на рис.2. Применительно к задаче оперативного планирования имеем: X – состояние среды, которое задается исходными данными для процесса оперативного планирования: потребность в выпуске изделий, с указанием директивных требований, производственные ресурсы, и.т.д.; Y – состояние объекта, определяемое вариантом оперативного плана. Помимо среды на состояния объекта влияет управляющее воздействие U , используемое в преобразовании F , которое изменяет состояние объекта: $Y=F(X,Y)$.

Команды управления U генерируются блоком адаптации с тем, чтобы подать управляющее воздействие на объект управления, т.е. скорректировать план. Для функционирования блока оценок ему надо задать цель Z^* , к которой следует стремиться в процессе управления. Для блока адаптации необходимо передать алгоритм управления ϕ – указание, как добиться поставленной цели. Таким образом, управление задается как: $U = \phi(X, Y, Z^*)$. Как видно, управление связано, прежде всего, с целями Z^* , которые формирует пользователь системы планирования. Цель адаптации формулируется в виде вектора $Z^* = (z_1^*, \dots, z_k^*)$, который задает критерии и ограничения оперативного планирования, представленные ранее в постановке задачи планирования.

Построение методов и моделей реализации блока адаптации является основным предметом данной главы. Рассмотрено два основных подхода к реализации данного блока: технология программных агентов и генетические алгоритмы.

Основу первого подхода составляет метод обучения с подкреплением. Предполагается, что каждому производственному заданию ставится в соответствие программный агент, задача которого сводится к выработке и реализации управляющих сигналов U_k , изменяющих значения вектора атрибутов y_k соответствующего задания. Таким образом, один агент эмулирует управление одним производственным заданием. Общая схема данного подхода отражена на рис.3. При такой организации каждый агент выступает в виде отдельной подсистемы нижнего уровня, отвечающей за адаптацию

Блок адаптации

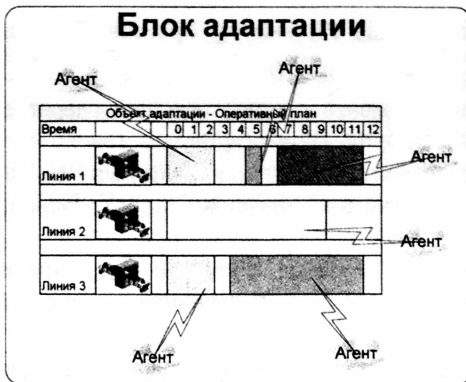


Рис.3. Составление расписания коллективом агентов

необходимо подобрать значения его вектора атрибутов y_k , которые оптимизируют значение целевой функции; при этом будут наилучшим образом выдержаны директивные требования и не будут нарушаться поставленные ограничения. Поисковая процедура вариации значений атрибутов задания $y_k = (y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kn})$ сводится к выполнению определенных операторов. В нашем случае под операторами, которые осуществляют направленный переход от одного решения к другому, подразумеваются эвристические правила или действия. Применимость того или иного правила зависит от так называемой ситуации или предпосылок, инициирующих выбор наиболее актуального действия. С этой целью предварительно формализуются конечные наборы характерных для отрасли, предприятия или конкретной задачи действий A и ситуаций S , которыми руководствуются плановики в процессе составления планов. Предполагается, что ситуация должна отражать текущее состояние агента, а именно, должно быть показано, нарушает ли агент какое-нибудь ограничение или насколько он близок к достижению локальной цели, т.е. выполнены ли директивные требования. Именно для организации процедуры направленного перехода от одного решения к другому каждый агент наделяется возможностью выполнения действия, изменяющие его состояние. Для этого в качестве архитектуры агента принята схема анимата на основе обучения с подкреплением, принцип которого проиллюстрирован на рис.4.

Непосредственно процедура поиска в адаптивной системе имеет итерационный характер. За одну итерацию каждый агент должен:

- 1) в соответствии с вектором состояния $y_k = (y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kn})$ определить актуальную ситуацию s_t , где t – дискретное модельное время адаптивной системы: $t = 1, 2, \dots$;

единственного, подотчетного ей производственного задания из оперативного плана.

Локальная цель отдельного агента – добиться выполнения директивных требований выпуска продукции и избежать конфликтов, связанных с использованием общего оборудования, а также нарушения технологических ограничений. Для всего коллектива агентов глобальная цель адаптации заключается в оптимизации значения целевой функции. Таким образом, в процессе поиска решения каждому агенту

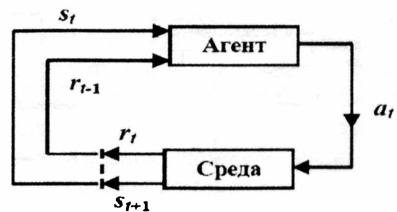


Рис. 4. Обучение с подкреплением в модели анимата

- 2) согласно актуальной ситуации по матрице обучения Q произвести выбор наиболее адекватного действия a_i , $a_i = \arg \max_a (Q'(s, a))$;
- 3) реализовать выбранное действие, применив соответствующий оператор, корректирующий значения вектора атрибутов $y_k^{i+1} = a_i(y_k')$;
- 4) оценить целесообразность предпринятого действия, получив сигнал подкрепления от среды r_i и рассчитать значение ΔQ^i от сигнала подкрепления r_i ;
- 5) скорректировать значение соответствующего элемента q_{sa} матрицы обучения Q в соответствии с полученной оценкой $Q^{i+1}(s, a) = Q^i(s, a) + \Delta Q^i$.

Последовательность выбора агентов в рамках одной итерации предлагается рассмотреть отдельно. Нередко локальные цели двух агентов могут противоречить друг другу, порождая конфликты и, как следствие, нарушения поставленных ограничений. В диссертации разработана каскадная схема взаимодействия между агентами, которая направлена на коллективное разрешение конфликтов, возникающих ввиду нарушения ограничений. Одним из примеров может служить разрешение ресурсных конфликтов. Предположим, что после реализации выбранного действия агент попадает в ситуацию, когда он начинает конфликтовать с другим агентом за использование одного и того же ресурса. Выделяют агента-инициатора и агентов-последователей конфликта. В случае если агент-последователь ранее уже рассматривался на текущей итерации алгоритма, конфликт считается неразрешимым, действие агента-инициатора отклоняется, и он автоматически получает сигнал штрафа от среды. В противном случае управление передается агенту-последователю, который реализует свое действие, и в случае возникновения нового конфликта он уже принимает на себя роль агента-инициатора. Таким образом, возникает цепочка взаимодействий агентов, которая представлена на рис.5. Цепочка считается выполненной, если последний агент ни с кем не конфликтует, т.е. не становится инициатором.

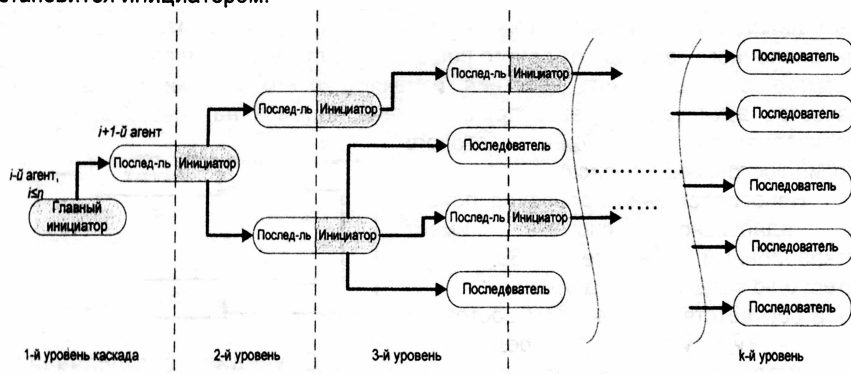


Рис. 5. Каскадная схема взаимодействия агентов

Вторым подходом в построению блока адаптации, применяемым в диссертации, являются методы эволюционной адаптации, в частности генетические алгоритмы (ГА). На рис.6 представлена схема кодирования хромосомы. Пусть имеется N групп генов, каждая из которых полностью определяет соответствующее задание: первой группе соответствует первое задание, второй – второе, и т.д. Значение гена определяет значение соответствующего атрибута задания.

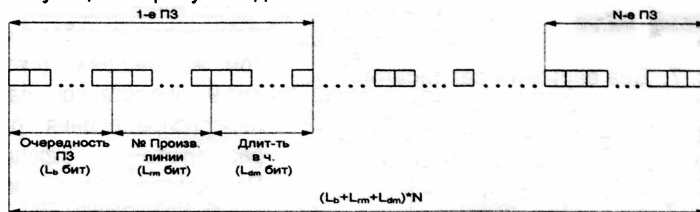


Рис.6. Схема кодирования хромосомы

Следует отметить, что идентификатор задания отдельно не кодируется, адрес гена жестко определяют параметры конкретного задания. Такой способ кодирования, при котором полезную информацию несут в себе не только значения генов, но и их позиции в хромосоме, минимизирует длину хромосомы. В качестве генетических операторов предлагается использовать следующие операторы: селекция, оператор репродукции, оператор кроссинговера, оператор мутации, оператор миграции. В работе введена модификация оператора кроссинговера применительно к задаче оптимизации построения расписаний.

В большинстве случаев специфика решаемой задачи закладывается в штрафные функции, используемые при расчете целевой функции агента (особи). Помимо использования штрафных функций предлагается видоизменить логику базовых операторов генетического поиска. Идея модификации сводится к применению правил, которыми руководствуются предметные эксперты в процессе построения расписания. Суть этих правил заключается в направленной корректировке отдельных параметров производственных заданий с целью разрешения коллизий, которые возникают при нарушении ограничений, обусловленных спецификой задачи. Модификация предполагает изменения базовых операторов мутации и кроссинговера. В частности для оператора кроссинговера применяется правило выбора аллелей при реализации скрещивания хромосом. Для наглядной иллюстрации модифицированной логики кроссинговера представлен упрощенный пример, в котором рассматриваются 5 работ и 3 альтернативные производственные линии. Выбраны две хромосомы, представляющие собой различные решения, а именно варианты назначения и последовательность исполнения работ производственными линиями. Каждый прямоугольник помечен индексом соответствующей работы. Прямоугольники расположены по горизонтали вдоль линий, определяющих ту или иную производственную линию. Таким образом, получаем вариацию диаграммы Ганта, чаще всего используемой для визуализации расписаний (рис.7).

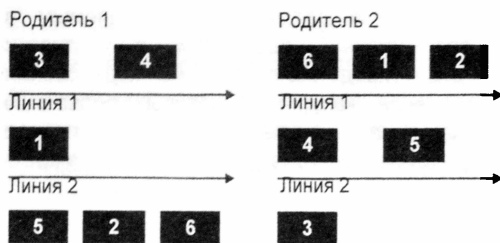


Рис. 7. Два варианта расписаний, построенных с помощью генетического алгоритма: родительские пары в модифицированном операторе кроссинговера

Линия 1	Родитель 1	Родитель 2		Потомок 1	Потомок 2
Пара 1	3	6	->	6	3
Пара 2	4	1	->	4	1
Пара 3	NULL	2	->	NULL	2

Линия 2	Родитель 1	Родитель 2		Потомок 1	Потомок 2
Пара 1	1	4	->	1	4
Пара 2	NULL	5	->	5	NULL

Линия 3	Родитель 1	Родитель 2		Потомок 1	Потомок 2
Пара 1	5	3	->	3	5
Пара 2	2	NULL	->	2	NULL
Пара 3	6	NULL	->	NULL	6

Рис.8. Решение задачи перераспределения работ: логика модифицированного оператора кроссинговера

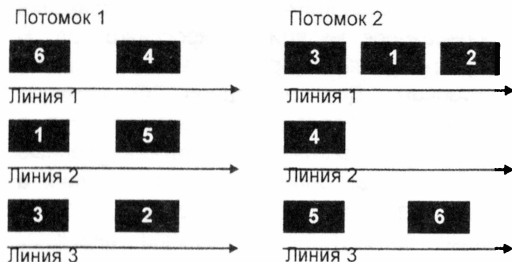


Рис.9. Результат перераспределения работ при использовании модифицированного кроссинговера

Для каждой производственной линии образуем пары работ, по одной из каждого агента. Для каждой пары случайным образом определяем будущую принадлежность потомку. При этом выполняется проверка на дублирование работ в одном и том же решении (рис.8). На рис.9 представлен результат перераспределения работ в результате скрещивания. Получены новые решения, заведомо исключающие нарушения ряда ограничений.

Таким образом, в логику базового генетического оператора добавлен фактор предопределенности, который исключает невозможные решения, т.е. тех потомков, которые не удовлетворяют ограничениям.

В последние годы большой интерес вызывают различные интегрированные и гибридные модели, включающие ГА. В диссертации предложен гибридный алгоритм, который сочетает подходы адаптивного и генетического поиска в рамках единого процесса оптимизации (рис.10). Идея гибридизации заключается в обмене решениями, которые получены каждым из этих алгоритмов в отдельности, при осуществлении процесса поиска

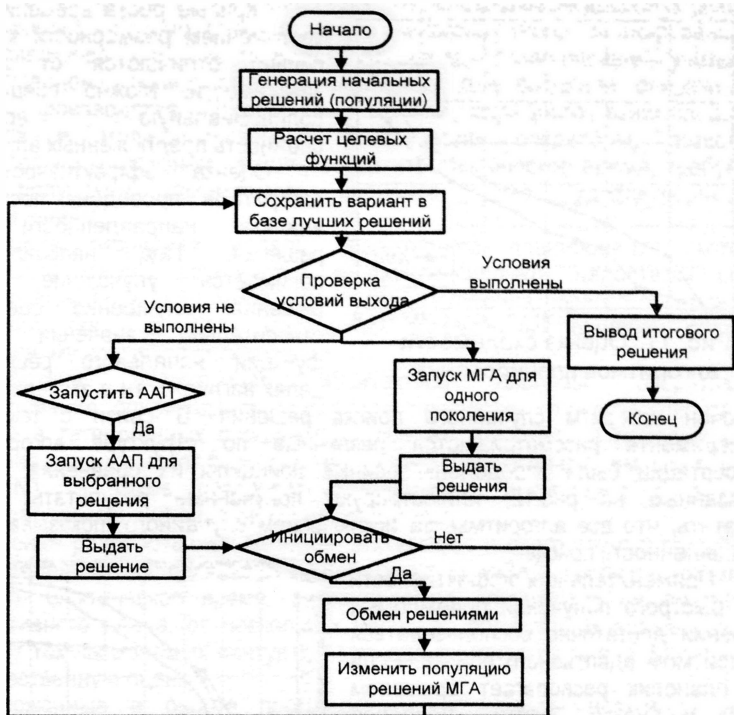


Рис. 10. Блок-схема гибридного алгоритма планирования

Четвертая глава содержит результаты исследований и архитектуру программного решения, основанного на разработках, представленных в главе 3.

Предложенные алгоритмы планирования были программно реализованы на языке ANSI C/C++ с использованием библиотеки шаблонов STL. Исполнимые модули поддерживают промышленные платформы UNIX, Linux, Win NT.

Экспериментальные исследования, проведенные в диссертации, преследовали две цели: анализ сходимости предложенных алгоритмов, и сравнение их эффективности.

Для анализа сходимости алгоритмов предложено установить характер зависимости временных затрат на поиск решения от размерности задачи (количества работ N , количества линий M , количество оснастки RD , горизонт планирования D). Под сходимостью понимается достижение такого значения целевой функции F , при котором за последующие δ циклов работы алгоритма изменение ΔF составит не более $\Delta\%$ от предыдущего значения. Для оценки сходимости были взяты следующие величины: $\delta=10$, $\Delta\%=1\%$. Исследование проводилось по двенадцати наборам исходных данных, выбранным экспертным путем. На рис.11 представлены полученные зависимости для алгоритма адаптивного поиска и модифицированного генетического алгоритма.

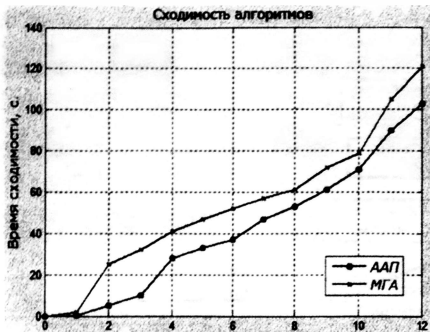


Рис. 11. Оценка сходимости алгоритмов планирования

включен алгоритм случайного поиска решения. В связи с тем, что в эксперименте рассматриваются различные по структуре алгоритмы, в диссертации были определены единые принципы их сравнения. Графики, показанные на рис.12, иллюстрируют полученные результаты. Следует отметить, что все алгоритмы, за исключением случайного, показывает явную направленность поиска.

Применительно к эффективности для быстрого получения приемлемых решений достаточно воспользоваться алгоритмом адаптивного поиска. Если же плановик располагает временем или требуется найти наиболее качественные решения, следует использовать алгоритмы с генетическим поиском.

Далее в работе приводится описание конкретного бизнес-процесса оперативного производственного планирования, который был автоматизирован в рамках внедрения ERP-системы ORACLE. Показан бизнес-шаг «Расчет производственного расписания», логика которого использует предложенные в работе подходы.

В **Приложении 1** приведена информация о промышленных объектах, на которых были внедрены результаты диссертации. **Приложение 2** содержит вид специально разработанных экранных форм системы ORACLE e-Business Suite для специалистов отдела планирования производства.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследована проблема оперативного планирования производства при наличии разнородных ограничений. Показана необходимость использования наряду с классическими методами оптимизации и теории расписаний эвристических методов, опирающихся на экспертную информацию.

Кривые роста времени счета с увеличением размерности задачи не сильно отличаются от линейной зависимости. Можно предположить полиномиальную временную сложность предложенных алгоритмов.

Оценка эффективности этих алгоритмов проведена посредством анализа направленности поиска решения. Под направленностью понимается улучшение качества решения. Улучшение оценивается относительно значения целевой функции начального решения. В целях наглядности в эксперимент был

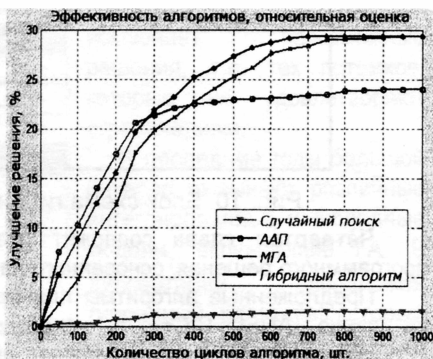


Рис.12. Относительная эффективность алгоритмов планирования

2. Решена задача планирования загрузки поточных линий в условиях цеховых ограничений. Разработаны алгоритм многоагентного планирования и модифицированный генетический алгоритм, позволяющие учитывать организационно-технологическую специфику при создании оперативного плана производства. Построенные модели каскадного взаимодействия агентов и модифицированные генетические операторы, позволили значительно (в среднем на 20%) сократить фактическое время, требуемое для получения приемлемого варианта плана, удовлетворяющего ограничениям.
3. Построена гибридная модель оперативного планирования, которая позволила учесть достоинства и компенсировать недостатки обоих оптимизационных алгоритмов, как в части получения первого приемлемого решения, так и в части нахождения эффективных решений согласно выбранному критерию оптимизации.
4. Разработана программная архитектура системы оперативного планирования, опирающаяся на подходы технологии «тонкого» клиента при работе в гетерогенных программных средах. Архитектура предложенного решения поддерживает большинство промышленных платформ: UNIX, Linux, WIN NT, а также позволяет осуществлять интеграцию с прочими корпоративными информационными системами.
5. Внедрение разработанных методов, алгоритмов и программных средств на промышленных площадках ОАО «Лебедянский» и ЗАО «ФМРус» позволило снизить фактическое время, затрачиваемое плановиком на подготовку оперативного плана, от нескольких часов до получаса. Впервые удалось уйти от так называемых «интуитивных» оценок качества плана и применить количественную оценку.
6. Предложенные в работе программные инструменты позволили гибко реагировать на изменение производственной программы путем быстрого пересчета производственных планов по несколько раз в сутки, что обеспечило повышение процента заказов, исполняемых в срок и, как следствие, улучшение степени удовлетворенности клиентов.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Громов С.А. Методы адаптивного и генетического поиска в оперативном планировании производства// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – №8. – С.74-80.
2. Громов С.А., Тарасов В.Б. Методы искусственного интеллекта в автоматизации оперативного планирования// Программные продукты и системы. – 2007. – №4. – С.89-92.
3. Громов С.А., Тарасов В.Б. Интегрированные интеллектуальные системы оперативного планирования производства// Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – №7. – С.60-67.
4. Громов С.А. Решение задачи загрузки оборудования с помощью алгоритма коллективной адаптации// Интеллектуальные системы и технологии: Научная сессия МИФИ-2002: Сборник научных трудов; В 14-и томах. – М., 2002. Т.3. – С.196-198.
5. Громов С.А. Применение алгоритма коллективной адаптации в задаче загрузки оборудования// Восьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика: Тезисы докладов; В 3-х томах. – М., 2002. Т.1. – С.262-263.

6. Громов С.А. Возможности использования ERP-системы для поддержки оперативного планирования производства// Chief Information Officer – руководитель информационной службы. – М., 2006. – № 9 (52). – С.44-49.
7. Громов С.А. Интеллектуализация систем оперативного планирования производства// Сборник трудов VI-й Международной научно-практической конференции г.Коломна, 16-19 мая 2011 г. – М., 2011. – Т.2. – С.588-598.
8. Громов С.А., Дубовенко А.А.. Построение модели функционирования многопродуктовой системы управления товарными запасами // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов II-го Международного научно-практического семинара. – М., 2003. – С.256-262.
9. Громов С.А., Дубовенко А.А. Применение алгоритмов адаптивного и генетического поиска для минимизации затрат при управлении товарными запасами в многопродуктовой системе// Труды Международных технических конференций IEEE AIS' 03 и CAD-2003, г.Дивноморск, 3-10 сентября 2003.– М., 2003.– Т.1.–С.34-38.
10. Громов С.А., Дубовенко А.А.. Построение модели функционирования многопродуктовой системы управления запасами// Проблемы создания информационных систем поддержки принятия управленческих решений для муниципальных образований. Материалы Московской областной межмуниципальной конференции. – М., 2003. – С.145-148.
11. Громов С.А., Дубовенко А.А. Исследование алгоритмов адаптивного и генетического поиска в задаче управления товарными запасами в многопродуктовой системе// Труды Международных технических конференций IEEE AIS' 04 и CAD-2004, г.Дивноморск, 3-10 сентября 2004г. – М., 2004. – Т.1. – С.34-38.
12. Громов С.А., Дубовенко А.А.. Возможности алгоритмов адаптивного и генетического поиска для решения задач оперативного планирования // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов III-го Международного научно-практического семинара. – М., 2005. – С.254-259.
13. Громов С.А., Дубовенко А.А.. Использование экспертных оценок для обучения алгоритмов генетического и адаптивного поиска в задачах оперативного планирования// Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник трудов IV-й Международной научно-практической конференции г.Коломна, 28-30 мая 2007г.; В 2-х томах. – М., 2007. Т.1. – С. 308 -313.
14. Громов С.А., Тарасов В.Б. Развитие информационных систем поддержки планирования производства: на пути к ERPIII// Реинжиниринг бизнес-процессов на основе современных информационных технологий. Системы управления знаниями: Сборник научных трудов XIII-й научно-практической конференции, г.Москва, 14 мая 2010 г. – М., 2010. – С.105-112.
15. Афонин П.В., Громов С.А. Разработка генетического алгоритма для решения задачи оперативного планирования производственных заданий// Труды Международного Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям: AIS-IT'2010, г. Дивноморск, 2-9 сентября 2010 г. – М., 2010.– Т.3.– С.18-23.