

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 11 (152)

ноябрь

2013

Редакционный совет:

АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СИРОТКИН О. С., чл.-корр. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮШЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ВОСТРИКОВ А. С., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., л. т. н., проф.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
КУЗЬМИН Н. Н., к. т. н., доц.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс., с. н. с.
ТИМОФЕЕВ А. В., д. т. н., проф.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ШАЛОБАЕВ Е. В., к. т. н., доц.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Тарарыкин С. В., Аполонский В. В., Терехов А. И. Исследование влияния структуры и параметров полиномиальных регуляторов "входа—выхода" на робастные свойства синтезируемых систем 2

Чебурахин И. Ф. О логическом управлении и обработке информации в дискретных технических системах на основе функциональных уравнений 9

УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Краснодубец Л. А. Аналитическое конструирование законов траекторного управления транспортными средствами на воздушной подушке 17

Брискин Е. С., Леонард А. В. О безударном режиме движения шагающей машины со двоянным поворотным движителем 25

ПЛАНИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Скобелев П. О., Симонова Е. В., Кожевников С. С., Майоров И. В., Феоктистов А. Л., Клейменова Е. М., Полончук Е. В. Обзор систем адаптивного планирования производства 28

Коростелев В. Ф. Управление процессами обработки металлов и сплавов по заданной траектории в пространстве состояний. 37

Дрозд О. В., Капулин Д. В. Моделирование систем управления и диспетчеризации технологических процессов с использованием современных информационных технологий 41

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Новоселов Б. В., Николаев В. Я. Концепция разработки, построения и эффективного использования сервисных средств следящих приводов 47

Епифанов О. К., Колпаков А. И. Тенденции развития современных силовых электронных модулей для электроприводов малой мощности. 52

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПРИКЛАДНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Соловьев И. В. Обнаружение и оценивание координат изображений звезд в датчиках астроориентации с помощью алгоритмов прогноза и фильтрации Калмана 59

Набатчиков А. М., Бурлак Е. А. Анализ характеристик деятельности человека-оператора в динамическом контуре слежения 63

Девятисильный А. С., Числов К. А. Нейросетевая коррекция безгироскопной инерциальной навигационной системы по спутниковой навигационной информации. 67

Contents 71

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

УДК 658.56

П. О. Скобелев, д-р техн. наук, Ген. директор,
skobelev@smartsolutions-123.ru,

Е. В. Симонова, канд. техн. наук, вед. аналитик,
simonova@smartsolutions-123.ru,

С. С. Кожевников, директор аналитического центра,
koz@smartsolutions-123.ru,

И. В. Майоров, вед. аналитик,
mayorov@smartsolutions-123.ru,
НПК "Разумные решения",

А. Л. Феоктистов, зам. Генерального конструктора по информационным технологиям,
Alexander.Feoktistov@rsce.ru,

Е. М. Клейменова, руководитель Научно-технического центра "Корпоративные информационные технологии",
elena.kleimenova@rsce.ru,

Е. В. Полончук, начальник отдела Научно-технического центра "Корпоративные информационные технологии",
Evgeny.Polonchuk@rsce.ru,
ОАО "ПКК "Энергия"

Обзор систем адаптивного планирования производства

Выполнен обзор мировых разработок в области систем адаптивного планирования производственных процессов промышленных предприятий. Обосновываются преимущества мультиагентной технологии и планирования и оптимизации ресурсов.

Ключевые слова: мультиагентная система, адаптивное планирование, производственный процесс

Введение

Несмотря на значительный прогресс в развитии теории оптимизации и создание крупномасштабных систем планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning (ERP-систем)), возможности предприятий по развитию адаптивной системы планирования остаются очень ограниченными [1].

На практике многие классические методы планирования и оптимизации ресурсов, разработанные в соответствии с предположением о том, что входные заказы и ресурсы для их выполнения известны заранее и не меняются в процессе планирования и выполнения плана, имеют ряд существенных ограничений:

- не учитывают сложность современных производственных предприятий, работающих с тысячами заказов и ресурсов, и не отражают интересы многих участников, вовлеченных в процесс производства;
- не предоставляют возможности для адаптивного планирования в реальном времени, что требует динамического разрешения конфликта в зависимости от ситуации при планировании с поддержкой взаимозависимости между всеми заказами и операциями;
- принимают все заказы и ресурсы идентичными, но на практике все они имеют свои собственные, индивидуальные критерии, предпочтения и ограничения, которые к тому же могут меняться в ходе работы;
- не предоставляют инструменты формализации и накопления знаний, специфичных для каждого предприятия;
- не позволяют оператору легко и в интерактивной форме объяснять и настраивать процесс планирования, а также интерактивно дорабатывать результаты планирования и т. д.

Поэтому разработка адаптивных систем планирования и моделирования технологических процессов промышленных предприятий является в настоящее время одним из приоритетных направлений.

1. Мировые разработки в области систем адаптивного планирования

В настоящее время разработки систем планирования и управления производственным процессом промышленных предприятий являются ведущей тенденцией в мире.

1.1. Автоматизированная система производственного планирования ORTEMS

Автоматизированная система производственного планирования ORTEMS (разработка компании Ortems S.A.S., Франция, официальный партнер компании Ortems S.A.S., отвечающий за локализацию и внедрение системы Ortems на предприятиях России, стран СНГ и Балтии — компания "АНД Преджект") дает возможность осуществлять стратегическое планирование производства с использованием ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators (KPI)) и оперативное управление на основе детальных данных о технологическом процессе. Ее возможности позволяют учитывать сотни единиц оборудования и операций в технологических маршрутах, проводить быстрые расчеты планов с учетом многообразных факторов

оптимизации и вносить в планы оперативные изменения [2].

Модуль программы планирования производства ORTEMS "Production Scheduler" предлагает для решения задачи планирования ресурсов производственного предприятия оптимальное решение — учет всех особенностей производственной среды, возможность составлять реалистичные расписания, видеть детальную картину производства в реальном времени и управлять им, добиваясь решения следующих поставленных задач производственной оптимизации:

1) оптимизация производственного расписания с учетом промышленных ограничений;

2) визуализация хода производственного процесса;

3) внесение интерактивных изменений и производственное перепланирование. ORTEMS позволяет заранее оценить влияние различных отклонений — выход из строя оборудования, задержки с поставкой сырья, отсутствие оператора на рабочем месте, изменение требований заказчика — на производственный план, а затем оперативно корректировать производственное расписание:

- перенести операции с одной машины на другую;
- приостановить выполнение операции;
- сбалансировать загрузку оборудования на участке;
- сместить выполнение операции во времени;
- скорректировать календарь работы оборудования или оператора;
- смоделировать поломки оборудования;
- оценить потребность в персонале;
- оценить потребность в комплектующих;
- оценить соответствие запланированного выпуска продукции уровням страховых запасов;

4) синхронизированное оперативно-производственное планирование ресурсов.

Задача оперативного планирования неразрывно связана с составлением производственного расписания, которое учитывает основные технологические ограничения и одновременно позволяет визуализировать ход производственного процесса.

Качество производственного расписания во многом зависит от степени детализации производственной модели. ORTEMS позволяет описать большинство процессов "как есть" в реальной жизни. Графики работы оборудования, операционная производительность линий, характер взаимосвязи между операциями, времена технологических переходов, приоритеты выбора оборудования при планировании, наличие операторов требуемой квалификации и графики их работы — это лишь некоторые примеры ограничений, которые ORTEMS учитывает при планировании.

Работа по формированию сбалансированного плана производства начинается с описания технологии производственного процесса в виде информационной модели. Эта модель представляет собой описание производственного процесса и включает описание технологических линий, операций мар-

шрутов, рецептов и спецификаций изготовления продукции, а также многие другие параметры.

Весь производственный процесс представлен графически — в виде диаграммы Гантта. На диаграмме пользователь системы — планировщик — видит производственное расписание как набор операций, расположенных в двумерном пространстве: оборудование и время. При этом гарантировано соблюдение правил технологических процессов — объекты диаграммы точно соответствуют всем нормативам, которые занесены в систему.

Типичный рабочий день планировщика, использующего систему ORTEMS, разбит на две части: до обеда и после обеда. До обеда — подготовка данных для планирования (планирование на ближайшие 3...14 дней — для предприятий с коротким циклом производства); после обеда — подготовка сменных заданий с учетом факта выполнения за предыдущие сутки. Таким образом, в системе ORTEMS реализован пакетный режим планирования, реакция на непредвиденные события осуществляется не в реальном времени, а путем перерасчета всего производственного плана после ввода соответствующей информации в систему.

1.2. Пакет SAP Business Suite

Пакет решений SAP Business Suite (Systems, Applications, and Products in Data Processing) (разработка компании SAP AG, Германия) предназначен для повышения эффективности процессов управления финансами, персоналом и бизнес-операциями. Интегрированные решения, включенные в пакет SAP Business Suite, позволяют предприятиям оптимизировать и реализовывать стратегии развития бизнеса и информационные технологии [3]. Пакет SAP Business Suite дает организациям возможность выполнять ключевые бизнес-процессы, ориентированные на конкретную отрасль, с помощью модульных решений, совместимых с другими программными продуктами SAP и решениями других разработчиков. Организации и отделы, независимо от отраслевой принадлежности, могут развертывать бизнес-приложения поэтапно, следуя собственным графикам, руководствуясь конкретными потребностями бизнеса и не прибегая к дорогостоящим обновлениям. Бизнес-решения компании SAP обеспечивают расширенные возможности обзора и анализа всех аспектов работы предприятия, повышение операционной эффективности и более гибкое реагирование на изменения в бизнесе. Решения SAP Business Suite основываются на открытой сервисно-ориентированной архитектуре (SOA) и работают на базе технологической платформы SAP NetWeave.

Одним из решений, предлагаемых компанией SAP, является компонент Production Planning (PP)/Detailed Scheduling (DS) (Планирование производства/Точное календарное планирование), который предоставляет специалистам по планированию на-

бор усовершенствованных инструментов и методов, обеспечивающих создание и оптимизацию календарных планов производства.

В состав Production Planning/Detailed Scheduling (PP/DS) входят как простые в использовании функции для работы с графическими планировочными таблицами, так и мощные средства для оптимизации на основе заданных ограничений. Таким образом, специалисты получают в свое распоряжение широкий набор возможностей по планированию (составление планов с участием одного или нескольких производственных предприятий, одновременная проверка наличия мощностей и материала, функции для постановки различных экспериментов, динамические ведомости разметки потребностей и т. д.).

С помощью динамических ведомостей разметки потребностей и операции распространения изменений на несколько уровней модели специалист-планировщик может внести изменения в график производства и сразу же увидеть, как это воздействие скажется на других процессах. Кроме того, окончательное распределение ресурсов и построение последовательности действий может быть выполнено либо вручную, либо с применением мощных оптимизирующих алгоритмов, что обеспечивает создание наиболее выгодного в данных условиях плана.

Перепланирование в реальном времени как реакция системы на непредвиденные события в пакете SAP Business Suite не выполняется. План строится на основе алгоритмов оптимизации и генетических алгоритмов, что затрудняет его использование в распределенных системах.

1.3. Пакет Infor SyteLine Suite

Infor SyteLine Suite — линейка продуктов компании Infor (США) [4]. Infor SyteLine Suite, в числе прочих, содержит систему синхронного планирования и оптимизации Infor SyteLine APS (Advanced Planning & Scheduling) — синхронное планирование и оптимизация — современное решение для планирования и составления производственных графиков. Система позволяет выполнять заказы клиентов точно в срок, обеспечивая при этом синхронизацию управления материальными потоками и снижение накладных расходов.

Система дает возможность определить реальные сроки выполнения заказа уже в момент его приема, а затем контролировать соблюдение этих сроков. Заказ клиента оказывается в центре всей системы бизнес-планирования, происходит синхронизация всех операций в соответствии с материалами и производственными мощностями, необходимыми для выполнения заказа точно в обещанный срок. Для оптимизации производственного графика применяется принцип "Точно-Во-Время" (Just-In-Time (JIT)).

Система APS расширяет возможности ERP-системы в области планирования путем тесной интеграции всех ключевых факторов — материалов,

производственных мощностей и производственных графиков — в мощный инструмент оперативного планирования в реальном времени.

Кроме того, Infor SyteLine APS дает возможность моделировать результаты управленческих решений, например, по изменению расположения рабочих центров или установки нового оборудования. Используя текущую конфигурацию оборудования, можно добавить оборудование или изменить технологические маршруты и получить информацию о том, какие изменения эти принесет в ближайшие шесть месяцев.

Система Infor SyteLine Suite решает задачи стратегического и оперативного управления предприятием, согласованного планирования и составления производственных графиков в реальном времени, однако не выполняет перепланирование производственных графиков при наступлении непредвиденных событий и настройку параметров ресурсов через учет различных стратегий и критериев, предпочтений и ограничений каждого участника планирования.

1.4. Планировщик JDA Software

Компания JDA Software Group, Inc (США) [5] — мировой лидер на рынке систем управления цепочками поставок и систем бизнес-прогнозирования. Планировщик JDA Factory Planner разработан для поддержки интеллектуальных решений в области производственного планирования. Решение помогает разработать календарный план как для одного предприятия, так и для нескольких интегрированных цехов различных предприятий. Планирование может проводиться "назад" — от требуемой даты, и "вперед" — от текущей даты, учитывая различные ограничения, такие как производительность, снабжение сырьем, предельная дата поставки. Планировщик позволяет менеджерам смещать фокус в сложных планах с одних участков на другие, более важные в данном плане. Применение JDA Factory Planner позволяет точно учитывать предельные сроки выхода продукции, уменьшать времена простоев оборудования и повышать прибыль.

Ключевые возможности:

- планирование с одновременным учетом всех имеющихся ограничений;
- управление приоритетностью исполнения заказов;
- оперативное изменение ряда исходных данных для перерасчета плана ("Что — если?");
- визуализация возникшего дисбаланса Спрос—Предложение после расчета плана;
- использование математического аппарата, адаптированного для нахождения глобального оптимального решения задачи оптимизации;
- отчеты по ключевым показателям эффективности;
- синхронизация планирования и выполнения.

Таким образом, JDA Factory Planner использует адаптированные классические алгоритмы оптимизации.

1.5. Exact Holding

Компания Exact Holding (Дания) [6] специализируется на ERP-решениях для малых, средних и больших предприятий. ERP-система Exact JobBOSS предназначена для средних и больших производственных компаний в сегментах дискретного производства, таких как машиностроение, аэрокосмическая промышленность, автотранспорт, электроника. Система позволяет повысить уровень организации производственных процессов от простого "заказ—выполнение" до полного управления цехами в трех направлениях: производство, финансы и распределение.

В производственном компоненте учитываются:

- спецификации производственных материалов;
- управление людскими ресурсами;
- учет производственных затрат;
- составление производственных календарных планов;
- планирование потребления расходных материалов;
- полный внутрицеховой контроль за производством. Планировщик Exact JobBOSS позволяет:
- гибко планировать работы по времени поступления, предельным срокам выполнения, глобально перепланировать весь список работ;
- контролировать загрузку производственных мощностей;
- получать отчеты о прохождении всех этапов работ, выявлять задержки и опоздания;
- автоматически планировать внешние требования на материалы и компоненты по технологическим требованиям;
- перепланировать "узкие места";
- создавать расписания, основываясь на наличии компонентов;
- использовать моделирование "Что — если?" для анализа нагрузки рабочих центров и влияния поставок.

1.6. Планировщики компании QuintiQ

Линейка продуктов компании QuintiQ (Нидерланды) включает систему расширенного планирования и составления расписаний Advanced Planning & Scheduling, а также систему производственного планирования Production Planning and Scheduling.

Основные преимущества Advanced Planning & Scheduling — Системы расширенного планирования и составления расписаний [7]:

- стратегическое, тактическое и оперативное планирование, соответствующее конкретным потребностям компании;
- полная видимость операций контроля и управления, а также ключевых показателей эффективности;
- непрерывная, в режиме реального времени, оптимизация планов в динамичной среде;

- управление событиями, повторная оптимизация планов и поддержка принятия решений в режиме реального времени;
- повышение качества обслуживания и удовлетворенности клиентов, сокращение производственного цикла;
- снижение эксплуатационных, транспортных расходов, а также расходов на инвентаризацию и обслуживание;
- максимальное использование ресурсов и производительности;
- повышение конкурентоспособности за счет дифференцированного предоставления услуг и более точного соблюдения времени выполнения операций.

Production Planning and Scheduling — Система производственного планирования [8] выполняет эффективное планирование производства. Планировщики QuintiQ помогают избежать наиболее распространенных проблем, таких как высокий уровень запасов, несоблюдение времени доставки клиенту, низкая доходность, неэффективное использование производственных мощностей. Решения QuintiQ для всех уровней планирования помогают оптимизировать весь цикл планирования производственных процессов, в том числе:

- мульти-сценарный планировщик QuintiQ Macro Planner предназначен для достижения общей прозрачности бизнеса и создания оптимальных средне- и долгосрочных планов производства при стратегическом планировании производства;
- планировщик QuintiQ Company Planner выполняет тактическое планирование производства и предназначен для управления в режиме реального времени взаимодействием между продажами, планированием и производством, и поддержкой реалистичных сроков поставки;
- оперативный планировщик производства QuintiQ Scheduler генерирует оптимизированный график производства.

Комплексное решение QuintiQ по планированию производства включает:

1. Планирование загрузки производственных мощностей.

Реализует адаптивный план использования производственных мощностей в ответ на все изменения в процессе производства и окружающей среде и решает, таким образом, многомерную задачу планирования. Пользователь может принимать обоснованные и точные решения о том, как использовать свои ресурсы наиболее эффективным и выгодным способом.

2. Управление материальными потоками.

Обеспечивает полную прозрачность, необходимую для оптимального заказа, распределения и пополнения материалов. Позволяет снизить уровень запасов за счет эффективного использования материалов и более точно соблюдать сроки поставок клиентам.

3. Планирование в реальном времени.

QuintiQ Production Scheduler позволяет создавать производственные графики, которые определяют оптимальную последовательность работ на ресурсах в конкретные сроки, что дает возможность определить потенциальные узкие места, реагировать в режиме реального времени на непредвиденные сбои в производстве, оптимизировать использование ресурсов и повысить производительность.

QuintiQ Production Scheduler дает возможность создавать наиболее эффективные производственные графики — дней, часов и даже секунд — до начала работ. Построение оптимального графика для каждого из ресурсов в реальном времени является сложной задачей даже тогда, когда вся информация доступна. Но почти в каждой производственной среде планирование динамично, так как достаточно часто происходят непредвиденные события, такие как срочные заказы, неисправности оборудования, задержки доставки материалов. Реакция на такие непредвиденные события в режиме реального времени имеет важное значение для минимизации их влияния на производственный план. Расширенный автоматизированный планировщик реального времени обеспечивает полную видимость производственного плана в любой момент времени и позволяет для каждого ресурса динамично принимать решение о том, какие действия надо выполнить и какие ресурсы использовать. Можно легко определить "узкие места", оценить влияние непредвиденных событий в режиме реального времени и уверенно справиться с ними, оптимизировать использование ресурсов, перепланировать, когда это требуется, и повысить общую производительность всего производства.

К недостаткам решений QuintiQ эксперты относят:

- некоторое отставание в части переноса решений в "облачные" технологии, мобильные устройства и интеграции в решения сторонних компаний;
- недостаточно развиты инструменты прогноза и их детализация.

1.7. Планировщики корпорации "Информационные технологии"

Корпорация "Информационные технологии" (Россия) [9] — ведущий разработчик программного обеспечения для автоматизации распределенных компаний, крупных и средних промышленных предприятий, предприятий финансового сектора, услуг, холдинговых структур.

Флагманский продукт — система IT-Enterprise — аккумулирует опыт успешных внедрений на предприятиях различного профиля. Функциональная полнота системы, гибкость настройки и адаптации позволяют получить индивидуальное решение для каждого предприятия, в максимальной степени учитывающее особенности его организации и деятельности.

IT-Enterprise — полнофункциональная ERP-, MRPII-, MES-, APS-, EAM-, SCM-, CRM-система, охватывающая все стороны деятельности пред-

приятия, а также обеспечивающая эффективное управление группой предприятий.

В связи с тем, что универсальные алгоритмы математической оптимизации являются неполиномиально разрешимыми (так называемыми NP-трудными с вычислительной точки зрения), математической основой календарного планирования в системе IT-Предприятие является комбинированное использование различных эвристических и оптимальных алгоритмов теории расписаний — специального раздела математической оптимизации.

В системе IT-Предприятие используются следующие алгоритмы и методы планирования:

- модель планирования по неограниченной загрузке — назначение на оборудование выполняется без анализа текущей загрузки оборудования;
- модели планирования по ограниченной загрузке — назначение на оборудование выполняется без перегрузки оборудования в каждый календарный интервал.

Варианты моделей планирования по ограниченной загрузке:

- ♦ планирование "вперед" от текущей смены только невыполненных технологических операций;
- ♦ планирование "назад" от даты исполнения заказа от последней операции до первых технологических операций;
- ♦ первоочередное планирование "узкого места" (наиболее загруженных рабочих центров) и планирование "назад" и "вперед" от "узкого места";
- ♦ модель "сглаживания" перегрузок оборудования с назначением работ на альтернативное оборудование;
- ♦ планирование от текущего наличия материалов и полуфабрикатов;
- ♦ планирование с учетом графика поступления материалов на предприятие;
- ♦ "ручное" (диалоговое) назначение заказа на оборудование, в том числе выбор предпочтительного с точки зрения плановика варианта техпроцесса;
- ♦ приоритетные очереди заданий:
 - по приоритетам заказов/клиентов;
 - по критическому отношению, срокам отгрузки, срокам приемки, остаточному времени выполнения, минимизации штрафов за просрочку, приоритетам изделий;
 - по приоритетам оборудования исходя из
 - ✓ максимизации оборудования,
 - ✓ минимизации переналадок;
 - по приоритетам выбора рабочих центров: минимальное количество оборудования, минимальное время окончания выполнения операций, минимальное время начала выполнения операции, только основное оборудование;
- ♦ планирование в решениях системы IT-Предприятие проводится в различных временных горизонтах — от смены до нескольких месяцев.

Таким образом, проведенный анализ мировых разработок в области планирования и управления предприятиями показал, что в большинстве адап-

тивных систем планирования не реализована возможность реакции на непредвиденные события и перепланирования производственной программы в реальном времени. Известные в настоящее время программные системы для управления производственными процессами на предприятиях таких известных компаний, как Infor, SAP, BAAN, i2, Manugistics, i-Log, 1С, Галактика и другие класса ERP, не позволяют осуществлять управление подобными распределенными сетевыми структурами в реальном времени, поскольку, как правило, работают в пакетном режиме.

2. Разработка адаптивных систем планирования на основе мультиагентных технологий

2.1. Актуальность разработки

Актуальность и значимость решаемой проблемы обусловлена тем, что многие крупные государственные корпорации в настоящее время активно ищут новые подходы к управлению, повышающие качество и эффективность деятельности, дающие возможность быстрого запуска и обновления инновационной продукции, имеющие большую оперативность и гибкость и т. д.

В результате, ранее закрытая, жестко иерархическая, монолитная структура любого завода, как правило, потребляющая при этом большие ресурсы, чтобы быть хотя бы "на плаву", постепенно становится более открытой, гибкой и эффективной. Более компетентные и умелые цеха выживают и становятся более самостоятельными и конкурентными сначала на внутреннем рынке предприятия, а потом — и на внешнем, а отстающие и дублирующие друг друга — постепенно отмирают или далее точно реформируются в инновационные, высокоэффективные и т. д.

Только за счет повышения согласованности, эффективности и гибкости возможно сохранение конкурентоспособности, что делает разработку адаптивных систем планирования и управления производством весьма актуальной и значимой. Однако данный подход существенно меняет требования к программным системам, используемым для управления ресурсами предприятий, которые должны поддерживать такую сетевую структуру, обеспечивать процесс формирования и согласования планов в реальном времени и т. д. При этом отсутствие возможности принятия решений "по ситуации" в реальном времени, когда качество управленческого воздействия зависит от самого момента времени, приводит к потере момента времени, "затоварке", простоя или дефициту ресурсов.

В связи с этим создание новых интеллектуальных систем для перехода к реальному времени при производстве и сбыте продукции машиностроительных предприятий, позволяющих работать в условиях неопределенности и высокой динамики изменений, когда ни число заказов, ни число ресурсов

Примеры промышленных применений мультиагентных систем в области машиностроения

Назначение/заказчик	Разработчик	Область применения	Внедрение
Production 2000+	Daimler Chrysler, Schneider	Manufacturing control	Industry
Car body painting	Daimler-Benz	Manufacturing control	Industry, prototype
BHP Billiton	Rockwell	Process control	Industry
Chilled Water System	Rockwell	Distributed control	Industry, prototype
Cambridge packing cell	U. Cambridge	Manufacturing control	Lab test bed
FABMAS	Technical University of Ilmenau	Manufacturing control	Industry
PS-Bikes	Universita de Genova	Manufacturing control	Industry, prototype
Axion-Holding	Smart Solutions, Knowledge Genesis Group	Manufacturing scheduling	Industry
Shop Modelarna Liaz	Certicon, Gerstner Laboratory	Production planning	Industry
SkodaAuto	Gedas, Certicon, Gerstner Laboratory	Production planning	Industry
Agent Steel System	Saarstahl AG, DFKI GmbH	Production planning	Industry
SDM Laboratory	Yokogawa	Machinery control	Lab test bed
NovaFlex	Uninova	Manufacturing control	Lab test bed
ADACOR	Polytechnic Institute of Braganca	Manufacturing control	Lab test bed
ABAS	Tampere University of Technology, Schneider Electric	Manufacturing control	Lab test bed
OntoReA	TU Wien, Rockwell Automation, COPA-DATA	Manufacturing control	Lab test bed

заранее не известно, позволит заместить устаревшие в этом отношении компоненты таких традиционных ERP-систем, как уже упомянутые выше SAP, Manugistics, i2, i-Log и других, ориентированные на классические "пакетные" формы работы.

В мире известен ряд проектов первых промышленных мультиагентных систем, реализованных для машиностроительных предприятий (см. таблицу) [10].

2.2. Мультиагентный планировщик завода "Шкода"

В рамках европейского проекта ExPlanTech (IST-1999-20171) была разработана мультиагентная система (MAC) планирования массовых производств [11, 12], успешно внедренная на заводах "Шкода" по сборке автомобильных двигателей (Чехия).

Представленная мультиагентная система является открытой и может быть адаптирована к широкому диапазону производственных процессов.

МАС состоит из следующих типов агентов:

- *Агенты планирования.* Они связаны с конфигурацией и составом продукции и создают производственные планы для отдельных заказов путем декомпозиции задач. Однако они могут использовать частичные планы, поступившие от внешних планирующих движков, применяющих линейное программирование, теорию ограничений или генетические алгоритмы.
- *Управляющие агенты.* Они занимаются разрешением конфликтов планирования и реконфигурацией планов.
- *Агенты ресурсов.* Агенты ресурсов первого типа отвечают за целостность системы и интеграцию с другими компонентами. Агенты ресурсов второго типа представляют конкретные устройства или рабочие центры.
- *Метаагент.* Метаагент отвечает за реконфигурацию планировщика и за отражение реальной ситуации цеха в создаваемом плане. Он также анализирует поведение отдельных агентов и вводит необходимые улучшения.

Планирование проводится на короткие (день) и длинные горизонты (полгода) на основании различных критериев, например, критериев минимизации затрат на хранение, уменьшения ручных работ, своевременной поставки продукции.

В системе предусмотрено динамическое перепланирование в режиме реального времени. В целом, система планирования достаточно быстродействующая: план на 28 дней из 50 продуктов и трех машин строится за 1 с.

Система внедрена на трех связанных линиях (ZK, RUMPH, ZP4), двух операционных складах и складе готовой продукции. Завод ежедневно производит до 2000 частей двигателей (66 % всего объема продаж). Двигатели собираются как из произведенных на предприятии узлов, так и из частей, закупаемых у внешних поставщиков.

Применение МАС-технологий в планировании работ по сборке двигателей показало высокую скорость и гибкость системы и эффективность получающихся планов.

2.3. Мультиагентные производственные планировщики НПК "Разумные решения"

Распределенная система управления предприятием, создаваемая из интеллектуальных систем управления типовыми цехами крупного машиностроительного предприятия (заготовительный, сборочный и др.) на основе мультиагентных технологий [13], обеспечивает возможность адаптивного построения и корректировки планов по событиям, поступающим в реальном времени, например, от пользователей или из существующих систем управления предприятиями, с датчиков линий автома-

тического производства, планшетов мастеров или сенсорных экранов рабочих, что может сразу вызывать перераспределение и пересогласование ресурсов в реальном времени. Переход к принятию решений в реальном времени обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов предприятий путем сокращения и устранения их простоев или дефицита, в частности, дорогостоящих станков с ЧПУ или остродефицитных кадров высококвалифицированных рабочих.

Согласованность решений интеллектуальных систем управления цехами при этом обеспечивается за счет реализации адаптивной p2p-сети указанных систем, от англ. "peer-to-peer", означающего взаимодействие между этими системами по принципу "равный с равным" и "каждый с каждым", в отличие от принятых доминирующих отношений "ведущий—ведомый" в каскадной (водопадной) модели бизнес-процессов управления предприятиями. Такой подход обеспечивает высокую оперативность, гибкость и адаптивность, производительность, масштабируемость, живучесть и надежность работы создаваемых интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий национального масштаба нового поколения, выгодно отличающихся от традиционных "пакетных" громоздких, централизованных, монолитных и последовательных систем.

На этой основе в короткие сроки была разработана интеллектуальная система управления инструментальным цехом машиностроительного предприятия для ОАО "Аксин-холдинг (Ижевский мотозавод)", обеспечивающим выпуск широкой номенклатуры инструментальных изделий как в интересах предприятия, одного из крупнейших в России по выпуску электронной продукции, так и в интересах других предприятий аэрокосмической отрасли.

В настоящее время на основе этих разработок заключены договора доработки и поставки интеллектуальных систем управления цехами машиностроительных предприятий с ОАО "АвиаАгрегат", выпускающим шасси для самолетов, и ОАО "Кузнецов", производящим авиационные и ракетные двигатели.

Подробное описание мультиагентных производственных планировщиков НПК "Разумные решения" приведено в работах [14—17].

2.4. Преимущества мультиагентной технологии

Важнейшим достоинством мультиагентной технологии в планировании и оптимизации ресурсов является возможность адаптивного построения и исполнения планов, когда план не строится всякий раз заново при возникновении новых событий, как это делается в классических методах оптимизации, а только адаптивно корректируется по мере появления событий в реальном времени, при необходимости (и при наличии ресурса времени) реализуя сколь угодно длинную цепочку изменений. Такая

автоматическая адаптация планов, причем часто в ходе их исполнения, осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в расписаниях, проведения переговоров и достижения компромиссов между агентами заказов и ресурсов, что и позволяет системе работать в реальном времени.

Функциональные возможности базовой интеллектуальной системы должны обеспечивать поддержку полного цикла управления ресурсами, при этом автономным организациям, включая:

- реакцию на динамически возникающие события, например, проявление нового заказа, ограниченность ресурса и т. п.;
- оперативное планирование и оптимизацию использования производственных ресурсов в условиях неопределенности и изменяющейся среды окружения;
- согласование изменяющихся задач с исполнителями в реальном режиме времени;
- мониторинг, отметки выполнения и контроль исполнения задач, учитываемые при планировании будущей деятельности;
- выявление расхождения между планом и фактом выполнения задач и инициацию перепланирования;
- визуализацию результатов планирования и хода выполнения планов в формах, наглядных и удобных для пользователей;
- построение отчетов для рассмотрения и утверждения руководством;
- обеспечение защиты информации, учитывая роли пользователей.

По мере ввода новых заказов или задач или возникновения непредвиденных событий в МАС динамически, в реальном времени, формируется и адаптивно модифицируется самоорганизующийся план работы цеха предприятия, а также рассчитываются заданные показатели деятельности.

Особенностью мультиагентного адаптивного метода распределения, планирования и оптимизации производственных ресурсов является построение и исполнение планов в реальном времени на основе концепции "живого расписания", когда планирование никогда не останавливается, а план лишь уточняется и корректируется, оптимизируется и дополняется по мере появления новых событий в скользящем режиме с формированием прогнозных показателей выполнения планов цехов на базе фактически выполненных работ или проактивно, когда у системы есть время улучшить результаты, например, до выдачи очередной работы сменного задания. Переход от статичных планов, построенных на период времени вперед, к динамичным, меняющимся непрерывно по событиям, является принципиальным, помогая предприятиям делать шаг к управлению в реальном времени, когда от самого момента времени зависит качество и эффективность работы, "затоварка" или дефицит по позициям и т. д.

При этом план лишь адаптивно корректируется и оптимизируется по мере появления событий в реальном времени, без его останова и полного пересмотра, причем динамическая оптимизация может охватывать сколь угодно длинную цепочку изменений, если есть ресурс времени. Такая автоматизированная адаптация планов "на лету", причем даже в ходе их исполнения, осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в доступных ресурсах, проведения переговоров и достижения компромиссов в формируемой сети агентов потребностей и возможностей предприятия.

Алгоритмы планирования, применяемые в МАС адаптивного планирования, обеспечивают управляемую скорость поиска и расчета допустимого решения, что может осуществляться за счет использования саморегулирующихся механизмов виртуального рынка, например, за счет использования изменяющихся виртуальных налогов, замедляющих или ускоряющих взаимодействие агентов.

Данный подход позволяет пользователю управлять вычислениями на виртуальном рынке системы, когда в зависимости от ситуации агентам становится выгодной или, наоборот, невыгодной активность по улучшению получаемых результатов в требуемом направлении.

Для описания различных технологических процессов, видов изделий, станков, рабочих специальностей и других особенностей цехов машиностроительных предприятий с помощью классов понятий и отношений разрабатывается онтология машиностроения.

На основе базовой интеллектуальной МАС могут быть построены специализированные интеллектуальные системы управления цехами, в том числе через настройку с помощью конструктора онтологий машиностроения. При этом каждая система управления цехом будет использовать технологии формализованного представления и обработки знаний на основе онтологий (семантических сетей) для описания структуры изделия, технологических процессов, особенностей рабочих и станков, а также иных обычно плохо определенных и не формализованных экспертных сведений, важных для планирования работы предприятий.

Заключение

При использовании мультиагентных технологий и онтологий для планирования и управления производством достигаются следующие преимущества:

- решается сложная задача автоматизации производственного планирования, контроля и прогнозирования работы ресурсов в реальном времени (в настоящее время на рынке имеются лишь пакетные планировщики);
- повышается эффективность работы предприятия на 5...15 %;
- обеспечивается быстрая оперативная реакция на непредвиденные события в реальном времени;

- деятельность становится более продуктивной: работы планируются и реализуются на основе детального расчета, анализа и сопоставления вариантов и более актуальных и достоверных данных;
- план работы является гибким и открытым к любым непредвиденным изменениям "на лету", учитывающим индивидуальные особенности заказов и ресурсов;
- план гораздо лучше отражает реальность, поскольку корректируется в ходе постоянной отметки выполнения работ по факту;
- обеспечивается полная прозрачность работы по всей цепочке связанных между собой операций бизнес-процесса;
- сокращается трудоемкость планирования, контроля и прогнозирования результата работы предприятия;
- повышается дисциплина и ответственность за результат исполнителей;
- уменьшается человеческий фактор (ошибки, искажение данных и т. д.).

Авторы выражают благодарность Министерству науки и образования РФ, поддержавшему разработку по созданию системы планирования, прогнозирования и моделирования производства по государственному контракту Минобрнауки РФ № ГК 14.514.11.4005.

Список литературы

1. **ERP** в машиностроении / TAdviser — портал выбора технологий и поставщиков. 2012. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/ERP-системы в машиностроении](http://www.tadviser.ru/index.php/ERP-системы%20в%20машиностроении).
2. **ORTEMS** — Optimization & Real Time Manufacturing Synchronization [Электронный ресурс] / ORTEMS. 2012. URL: <http://www.ortems.ru>.
3. **SAP Business Suite** / SAP. 2012. URL: <http://www.sap.com/cis/solutions/business-suite/index.epx>.
4. **Infor Enterprise Software Solutions for CRM, ERP, SCM, EAM & More** / Infor. 2012. URL: <http://www.infor.com>.
5. **Supply Chain Management and Software** — JDA Software: The Supply Chain Company / JDA Software. 2012. URL: <http://www.jda.com/>.
6. **FMI: Home Page** / Forrest Machining, Inc. 2012. URL: <http://www.forrestmachining.com/>.

7. **QuintiQ Advanced Planning and Scheduling** / QuintiQ. 2012. URL: <http://www.quintiq.com/solutions/advanced-planning-and-scheduling.aspx>.

8. **QuintiQ Production Planning and Scheduling** / QuintiQ. 2012. URL: <http://www.quintiq.com/solutions/production-planning-and-scheduling.aspx>.

9. **Автоматизация** предприятия, комплексная информационная система управления бизнесом. Корпорация Информационные Технологии IT Enterprise / Корпорация "Информационные технологии" — 2012. URL: www.it-enterprise.ru.

10. **Paulo Leitao, Pavel Vrba**. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Proc. of 5th International Conf. on Holonic and Multi-Agent systems in Manufacturing, France, Toulouse, 2011. Springer, Berlin. P. 15—28.

11. **Michal Pechoucek**. Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies / Michal Pechoucek, Vladimír Marík // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2008. N 3. P. 397—431.

12. **Pechoucek M., Rehak M., Charvat P., Vleck T., Kolar M.** Agent-Based Approach to Mass-Oriented Production Planning: Case Study // Journal IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews archive. 2007. № 3. P. 386—395.

13. **Андреев М. В., Бабанин И. О., Вылегжанин А. С., Иващенко А. В., Кольбова Э. В., Скобелев П. О.** Мультиагентная система управления инструментальным цехом // Тр. XIII междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара: СНЦ РАН. 2011. С. 451—459.

14. **Tyrin I., Vylegzhanin A., Andreev M., Kolbova E., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya.** Multi-Agent System "Smart Factory" for Real-time Workshop Management: Results of Design & Implementation for Izhevsk Axion-Holding Factory // Proc. of 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA'2012). Krakow, Poland. 2012.

15. **Goryachev A., Kpzhchnikov S., Kolbova E., Kuznetsov O., Simonova E., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya.** "Smart Factory": Intelligent System for Workshop Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling in Real Time // Proc. of the 2012 International Conference on Manufacturing (Manufacturing 2012), November 14—15, 2012. Macau, China. Advanced Materials Research. V. 630(2013). P. 508—513, Trans Tech Publications, Switzerland.

16. **Тюрин И. Ю., Вылегжанин А. С., Кольбова Э. В., Скобелев П. О., Шепилов Я. Ю.** Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО "Ижевский мотозавод — Аксион Холдинг" // Мехатроника, автоматизация, управление, 2012. № 11. С. 15—19.

17. **Shpilevoy V., Shishov A., Skobelev P., Kolbova E., Kazanskaia D., Shepilov Ya., Tsarev A.** Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production // Proc. of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13), May 22—24, 2013, São Paulo, Brazil. 2013. P. 65—70.

ИНФОРМАЦИЯ



XVI КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ»

11—14 марта 2014 г.,

Санкт-Петербург, Россия

Тематика конференции

- Гироскопические системы;
- Интегрированные и спутниковые системы навигации;
- Теория и системы управления;
- Обработка информации в навигационных системах;
- Электронные и электромеханические устройства систем навигации и управления;
- Чувствительные элементы систем навигации и управления;
- Интеллектуальные системы навигации и управления;
- Информационные технологии на предприятиях навигационного приборостроения;
- Микромеханические датчики, системы и технологии;
- Прикладные задачи навигации и управления движением;
- Образовательные технологии.

Подробную информацию о конференции см. сайте:

<http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2014/>

