

УДК 005.8:615.478

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ «SMART FACTORY» ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В. Ф. Шпилевой,

заместитель исполнительного директора
ОАО «Кузнецов», г. Самара

П. О. Скобелев,

доктор техн. наук, директор по разработкам

Е. В. Симонова,

канд. техн. наук, доцент, ведущий аналитик

А. В. Царев,

генеральный директор

С. С. Кожевников,

директор аналитического центра

Э. В. Кольбова,

ведущий аналитик

И. В. Майоров,

ведущий специалист исследовательского отдела

Я. Ю. Шепилов,

ведущий разработчик

ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара

Описаны принципы разработки мультиагентной системы «Smart Factory», предназначенной для управления ресурсами производственных цехов машиностроительных предприятий в режиме реального времени. Мультиагентная технология обеспечивает возможность гибко реагировать на непредвиденные события, возникающие в условиях производственного процесса, что позволяет планировать, оптимизировать и контролировать работу персонала предприятий в реальном времени. Представлены разработанный метод адаптивного планирования ресурсов, основные функции, архитектура и интерфейс системы. Показано, что внедрение интеллектуальной системы «Smart Factory» дает возможность выполнить работу в заданные сроки, снизить затраты и уменьшить риски.

Ключевые слова — управление ресурсами, машиностроительное производство, мультиагентная технология, интеллектуальная система, оперативное планирование, режим реального времени.

Введение

Мультиагентная система «Smart Factory» направлена на повышение эффективности работы производственных цехов машиностроительных предприятий. В условиях любого машиностроительного завода это достигается путем гибкой согласованной корректировки производственных планов в ответ на изменения в окружающей среде в зависимости от возникающих событий. В результате в системе должны одновременно осуществляться процессы распределения ресурсов, планирования, оптимизации, мониторинга

и контроля выполнения заказов в режиме реального времени.

Система может применяться на машиностроительных заводах, которые характеризуются постоянными инновациями, существенной сложностью изделий и высокой динамикой изменений в среде, а также априорной неопределенностью спроса и предложения, требующей адаптивности при реакции на непредсказуемые события в режиме реального времени.

Система также полезна для создания специфической базы знаний о производственных процессах, изделиях и материалах, оборудовании и

работниках для обеспечения индивидуального подхода к каждому заказу или ресурсу, позволяет строить более точные и физически исполнимые планы при любых событиях, к числу которых можно отнести появление высокоприоритетного заказа, отказ оборудования, задержку в поставке материалов и т. д.

Современное состояние исследований и разработок в рассматриваемой области

Несмотря на значительный прогресс в развитии теории оптимизации и создании крупномасштабных систем планирования ресурсов предприятия (ERP-системы), возможности предприятий по развитию адаптивной системы планирования остаются очень ограниченными [1, 2]. Традиционные ERP-системы включают в себя подсистемы сбора заказов, крупные базы данных для заказов и ресурсов, подсистемы учета и отчетности и множество других компонентов. Однако в этих системах поддерживается пакетное планирование, допускающее ручную корректировку. Системы планирования, предлагаемые такими известными компаниями как SAP, Oracle, JDA, i2, ILOG, Preactor и др., обычно реализуют ограниченные методы программирования, основанные на комбинаторном поиске вариантов в сочетании с некоторой эвристикой [1, 2].

Эти методы и инструменты разработаны в соответствии с предположением, что входные заказы и ресурсы для их выполнения известны заранее и не меняются в процессе планирования и выполнения плана. Но в реальной жизни ситуация совершенно другая: появились новые заказы, заказ отменен или перенесен, оборудование сломалось, работник отсутствует, не хватает детали и т. д.

В результате на практике многие классические методы планирования и оптимизации ресурсов 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;

- предполагают все заказы и ресурсы идентичными, но на практике каждый из них имеет свои собственные индивидуальные критерии, предпочтения и ограничения, которые могут изменяться в ходе работы;

- не предоставляют инструментов формализации и накопления знаний, которые специфичны для отдельного предприятия и влияют на качество планирования, например, набор навыков каждого работника;

- не позволяют оператору легко и в интерактивной форме настраивать процесс планирования, а также интерактивно дорабатывать результаты планирования и т. д.

Поэтому многие диспетчеры цехов до сих пор на практике используют Excel-таблицы для ручного планирования и оптимизации ресурсов.

Метод адаптивного планирования на основе мультиагентной технологии

В отличие от традиционных систем планирования ресурсов предприятий, работающих в пакетном режиме (в рамках ежедневных, еженедельных, ежемесячных циклов планирования), предлагаемая система, в зависимости от возникающих событий, постоянно функционирует на сервере в режиме реального времени, позволяя адаптивно проводить перепланирование выбранных заказов и ресурсов, на которые оказывают влияние приходящие события. Разработанный метод адаптивного планирования в реальном времени основан на мультиагентной технологии [3, 4] с использованием онтологии, которая включает типичные классы оборудования, технические характеристики структуры продукции и технологические процессы (наборы связанных операций), навыки работников и т. д.

Адаптивность означает, что даже «небольшое» событие может вызвать неожиданно длинную цепь изменений в планах, находящихся в «неустойчивом равновесии» (система никогда не останавливается), и даже влиять на план всего цеха. Но на практике эти «волны изменений» ограничены премиями и штрафами виртуального рынка агентов и могут быстро затухать или быть принудительно остановлены после определенного числа шагов.

План работ цеха строится не просто как статичный файл данных, полученный в виде классического комбинаторного поиска, но как баланс интересов вовлеченных в процесс агентов потребностей и возможностей, достигаемый путем выявления конфликтов и проведения переговоров агентов. В процессе переговоров система учитывает текущее состояние планов, значимость заказов, структуру продукции, технологические процессы, навыки работников, доступность оборудования, материалов и инструментов, последовательность работы и время выполнения операций.

При необходимости диспетчер цеха может активно вмешаться в план в интерактивном ре-

жиме в любое время, проведя ручную доработку плана (по принципу «drag & drop» — «потянуть и бросить»), при этом для всех зависимых операций план будет автоматически изменен. Результаты планирования для работников отражаются на сенсорных терминалах, поддерживающих возможность интерактивной коммуникации с менеджерами, инженерами и рабочими.

Все эти функции дают возможность существенно сократить сложность планирования и сделать его более быстрым, адекватным, точным, достоверным, а также удобным для пользователя. Пользователи могут имитировать приход нового заказа и проверить, как он будет размещен в текущем производственном плане и как повлияет на другие заказы, например, сдвинет или вытеснит размещенный ранее менее значимый заказ или приведет к задержке выполнения других заказов.

Функциональные возможности системы

Рассматриваемая система работает автономно и предлагает следующие возможности по управлению ресурсами:

- сохранение характеристик оборудования, процессов и технологии;
- автоматический импорт продукции и технологических процессов из CAD-систем;
- введение нового заказа или других важных событий в любое время;
- моделирование и оценку того, как новый заказ влияет на предыдущие заказы, его планирование и запуск на исполнение;
- проверку стоимости этого заказа в новых условиях;
- адаптивное и гибкое перераспределение и перепланирование ресурсов;
- проактивную оптимизацию производственного плана (при наличии времени);
- визуализацию сформированного плана в режиме реального времени;
- поддержку применения нескольких стратегий планирования с различными критериями;
- интерактивное улучшение планов для всех ресурсов;
- связь с пользователями для координации и согласования действий;
- назначение задач на каждый рабочий день по каждому рабочему в режиме реального времени (динамическое сменно-суточное задание);
- мониторинг и контроль выполнения задач;
- регистрацию обратной связи от рабочих по задачам (начало — остановка — задержка — выполнение);
- оперативный контроль разницы между производственным планом и фактом выполнения;

— перепланирование в случае роста разрыва между планом и фактом;

— автоматические отчеты на бизнес-радаре в реальном времени.

В систему могут быть интегрированы существующие программы по складскому учету, расчету заработной платы, бухгалтерскому учету и отчетности и т. д.

Архитектура и типовой интерфейс системы

Система адаптивного планирования (рис. 1) построена на основе мультиагентной технологии, использующей концепцию виртуального рынка для организации коммуникации между агентами, а также онтологию для представления знаний предметной области и описания моделей ситуаций (сцен), возникающих в процессе планирования [3, 4].

Мир агентов сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) / Виртуальный рынок (Virtual World of Resource-Demand Networks / Virtual Market) — место работы агентов ПВ-сети, в котором запускаются и исполняются экземпляры классов агентов. Агенты могут под управлением исполняющей системы создаваться и уничтожаться в мире, существовать в мире, принимать и передавать сообщения, обращаться в сцену для чтения информации, записывать информацию в сцену, подписываться на события и получать уведомления и т. д.

Онтология (Ontology) — структура данных, представляющая собой модель знаний предметной области, которая используется для построения моделей начальных ситуаций или их корректировки. Имеются базовые онтологии, которые могут дополняться специализированными для предметной области понятиями и отношениями, а также специальными расширениями для каждого отдельного предприятия.

Архитектура системы состоит из четырех основных уровней: платформы, продукта, предметной области, приложения (см. рис. 1).

Исполняющая система (Run Time Multi-Agent Execution System) — подсистема, обеспечивающая асинхронное выполнение программ агентов при переходе из одного состояния в другое (диспетчер агентов) и передачу сообщений между агентами, при котором агент получает «квант» времени на обработку событий и далее возвращает управление диспетчеру для продвижения следующих агентов, т. е. агенты работают как сопрограммы.

Очередь событий (Event Queue) — подсистема, обеспечивающая накопление событий, приходящих из внешнего мира, и их последовательную обработку. Система управляется собы-



■ Рис. 1. Структура модуля адаптивного планирования

тиями, при каждом событии сохраняется метка времени его поступления. Порядок поступления событий на обработку регулируется, когда следующее событие поступает после завершения обработки предыдущего, при этом в первую очередь выбираются приоритетные события и т. д.

Конструктор онтологий (Ontology Editor) позволяет вручную корректировать начальную сцену или вносить в нее изменения в ходе работы.

Библиотеки планирования (Basic Virtual Market & Domain-Specific Extensions) содержат базовые и специализированные компоненты, обеспечивающие работу классов агентов ПВ-сети и их переговоры на виртуальном рынке (например, выявление конфликтов, определение зон перекрытия, расчет сдвигов и т. п.), доступ к сцене, содержащей формализованную модель ситуации, а также эластичную обработку критериев, предпочтений и ограничений агентов, расчеты микроэкономики и поддержку счетов агентов и другие функции.

Специализированные компоненты и интеграция со сторонними системами (3rd Party & Integration Components) — компоненты, которые позволяют выполнять дополнительные функции для предметной области (например, расчет расстояний по карте для грузовиков и т. д.).

Сцены мира (Scene of the World) — основные структуры данных, которые содержат формализованную модель ситуации во внешнем мире, могут уточняться через онтологию и корректироваться событиями. Сцена содержит первоначальное описание ситуации, которое далее постепенно трансформируется в решение проблемы с учетом поступающих событий. В результате сцена содержит новый план действий для пользователя (водителя грузовика, мастера, рабочего и т. д.).

База данных (Data base) позволяет сохранять исходные и промежуточные сцены, а также сцены с результатом решения проблемы.

Ключевая логика системы планирования реализована в составе агентов, которые функционируют от имени заказов, продукции, работников, станков, материалов и т. д. В процессе жизненного цикла агенты могут реагировать на события, но также функционировать проактивно, выявляя в плане проблемы и пытаясь их решить.

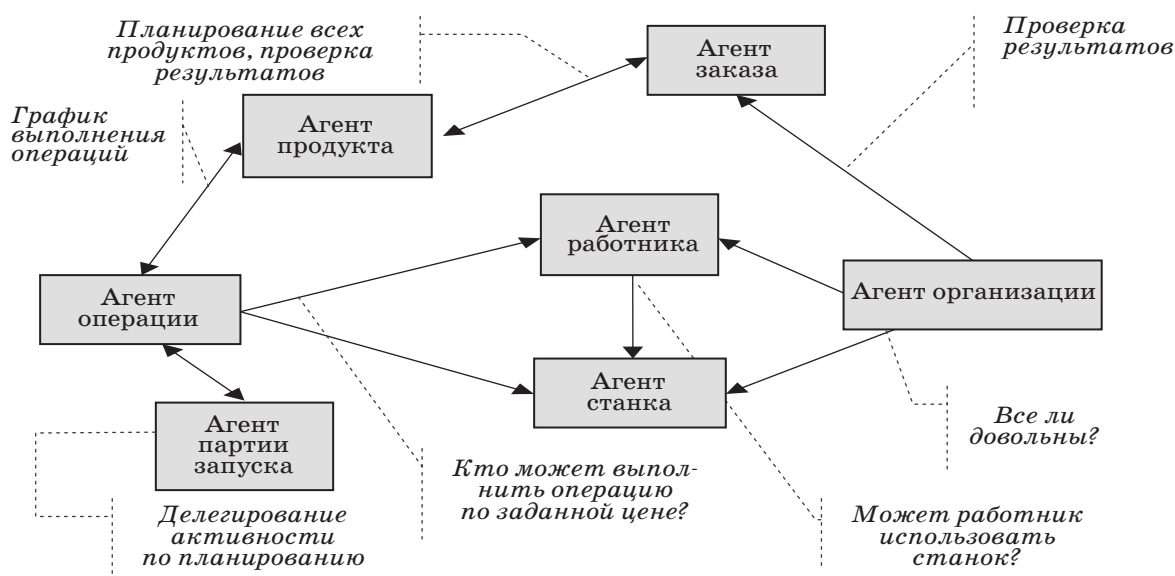
Список разработанных ключевых агентов представлен в таблице.

Основные направления переговоров между агентами показаны на рис. 2.

План цеха представляет собой сцену мира, которая формируется в виде семантической сети объектов и отношений онтологии планирования,

■ Основные классы агентов

Имя агента	Описание агента	Атрибуты
Заказ	Заказ ищет лучшие возможности для реализации	Стоимость, приоритет, срок, другие подробности
Организация	Пытается достигнуть и улучшить ключевые показатели эффективности системы, наблюдая за ситуацией, меняет стратегию, вводит ограничения и предпочтения для обеспечения согласования вовлеченных в процесс сторон	Организация, тип организации, руководитель, ответственные, ожидаемые результаты и показатели
Работник	Хочет быть занятым все рабочее время и получать бонусы за качество, производительность и т. д., а также усовершенствовать свои навыки работы для достижения более высокого уровня квалификации	Организация, план, возможности, профессии, известные модели станков, производительность, зарплата
Станок	Хочет быть загруженным как можно больше, но также требует профилактики и ремонта	Организация, модель станка, потребление энергии, график ремонтов
Технологический процесс	Обеспечивает координацию технических операций, необходимых для выполнения заказов	Срок выполнения, операции, материалы, параметры деталей
Технологическая операция	Выполняет поиск наилучших работников и станков с учетом предпочтений по времени завершения/ начала операции	Профессия, разряд, модель станка, продолжительность, предпочтения по времени завершения/ начала
Агент партии запуска	Пытается объединить работы по одинаковым деталям для повышения их эффективности	Внутренние операции
Другие агенты	Материалы, инструменты, транспорт и т. д.	



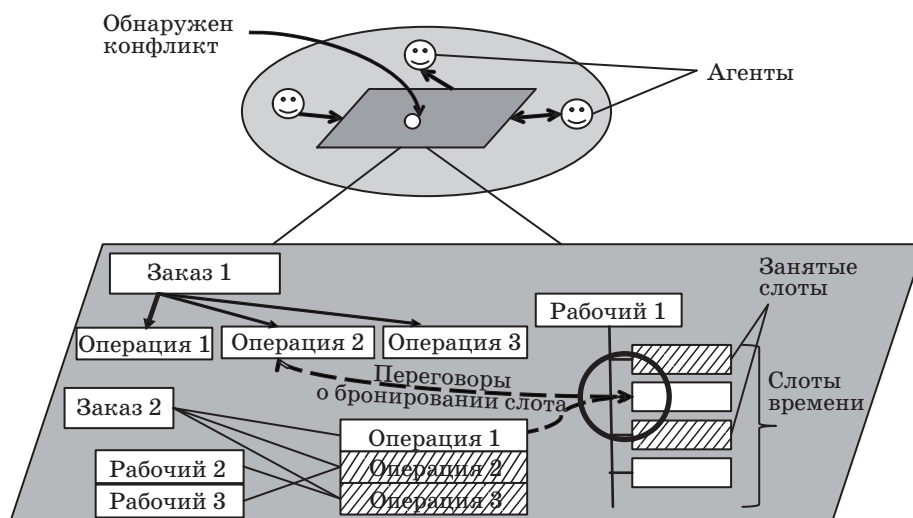
■ **Рис. 2.** Основные протоколы коммуникации между агентами

связывающих заказы и операции, операции и работников и т. д. (рис. 3). Данные связи постоянно исследуются агентами и помогают им для ограничения комбинаторного поиска и нахождения допустимых вариантов через анализ «топологии» плана (связок операций).

В системе на экране отображаются все заказы цеха с текущим статусом и различными фильтрами для их визуализации (рис. 4). Типовые

статусы заказов: не начат, планируется, начат, выполнен, в процессе подготовки, остановлен, задерживается, отложен и т. д.

Очередь событий дает возможность пользователям вводить информацию о новых событиях и запускать процесс перепланирования, например, ввод в производство нового заказа, компоненты которого отображены слева (рис. 5). Комбинация диаграмм Ганта и Перта показы-



■ Рис. 3. Представление сцены

МАС - Инженер ПДБ

Файл Заказы Справочники Отчеты

Импортировать Обновить статус Пересчитать трудоемкость Состав заказа Дерево ДСЕ Копировать Добавить Редактировать Удалить

Дата з...	Заказчик	Тип зак...	Дата с...	Состоян...	Номер СТО	Фактически...	Планов...	Трудо...	Предва...	Смена	Наимен...	Номер д...	К...	Вид...	Техно...	Приори...	Ц...
18.11...	Холдинг	внутрен...	31.12...	сдан	БИ1886-5671	30.01.2012	110,37	101,8	52,9	№9012...	ПРЕССФ...	ЦТЕА78...	1	12.1...	Закир...	Цеховой	№935
06.05...	Холдинг	ремонт...	31.05...	заплани...	БИ1836-3661	13.03.2012	35,2301	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
02.11...	Холдинг	внутрен...	30.11...	сдан	БИ0604-7556	31.01.2012	275,6356	65,9056	160	№9012...	ПРЕССФ...	ЦТЕА82...	1	28.1...	Закир...	Цеховой	№935
03.11...	Концер...	внутрен...	28.02...	сдан	БИ0611-3029	31.01.2012	431,4644	383,2604	322	№9012...	прессф...	ОБЩ.ПР...	1	17.1...	Голуб...	Заводс...	№965
03.11...	Концер...	внутрен...	29.02...	заплани...	БИ0611-3029/80	13.02.2012	134,43	107,72	17,4	№9012...	прессф...	общ.прим.	4	24.1...	Голуб...	Заводс...	№965
08.09...	Холдинг	ремонт...	30.09...	заплани...	БИ0607-4805	18.04.2012	160,582	29,61	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
12.07...	Холдинг	ремонт...	29.07...	заплани...	БИ1835-3722	14.03.2012	19,652	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
18.10...	Холдинг	ремонт...	31.10...	заплани...	БИ0605-4119	22.02.2012	23,7703	13,03	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Голуб...	Отсутс...	№935
24.11...	Концер...	внутрен...	15.02...	в работе	БИ0607-4665/89	13.02.2012	10,832	0	2,66	№9012...	прессф...	ЮМПИ73...	4	09.0...	Закир...	Заводс...	№965
03.06...	Концер...	ремонт...	30.07...	заплани...	БИ0607-4888	06.03.2012	428,081	303,821	-	№9012...	ПРЕССФ...	ЮМПИ73...	1	-	Голуб...	Отсутс...	№965
02.08...	Холдинг	ремонт...	31.08...	заплани...	БИ1886-5636	19.03.2012	56,758	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
30.11...	Холдинг	ремонт...	30.12...	заплани...	БИ1886-5554	02.03.2012	28,734	4,44	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Голуб...	Отсутс...	№935
29.11...	Холдинг	внутрен...	31.03...	заплани...	БИ0604-7560	27.03.2012	101,47	0	49,5	№9012...	ПРЕССФ...	ДУИ832...	1	19.0...	Закир...	Отсутс...	№935
06.05...	Холдинг	ремонт...	31.05...	заплани...	БИ1836-3892	16.03.2012	22,8601	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
07.12...	Холдинг	ремонт...	30.12...	в работе	В950-7797	16.05.2012	150,422	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Голуб...	Отсутс...	№935
16.08...	Холдинг	внутрен...	31.08...	заплани...	БИ1886-5653	04.04.2012	29,872	0	36	№9012...	ПРЕССФ...	ИЗ86833951	1	25.0...	Голуб...	Отсутс...	№935
08.08...	Холдинг	внутрен...	31.08...	заплани...	БИ1835-4244	03.05.2012	91,34	0	58	№9012...	ПРЕССФ...	ЦЕ78608911	1	18.0...	Закир...	Отсутс...	№935
06.05...	Холдинг	ремонт...	31.05...	заплани...	БИ1836-3776	29.02.2012	22,6801	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
22.09...	Холдинг	внутрен...	31.03...	заплани...	БИ1886-5658	15.03.2012	189,85	47,63	119	№9012...	ПРЕССФ...	ШИКС75...	1	15.1...	Закир...	Цеховой	№935
30.05...	Холдинг	ремонт...	30.06...	в работе	БИ1880-3074	01.06.2012	788,756	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
22.11...	Концер...	внутрен...	28.02...	заплани...	БИ0611-3028	12.03.2012	361,58	117,45	353,1	№9012...	прессф...	общ.прим.	1	06.0...	Голуб...	Генера...	№965

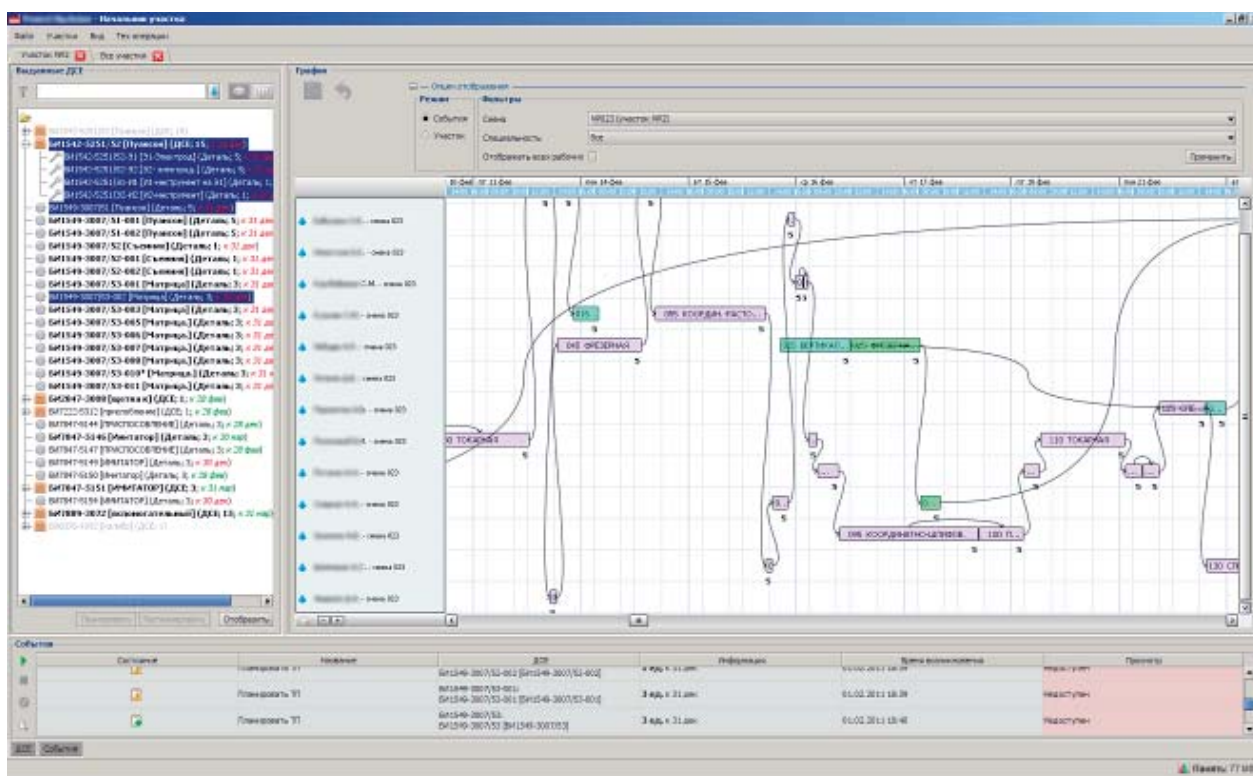
Поиск: прессформа отобразить сданные с заготовками архивированные

Память: 48 Мб

■ Рис. 4. Статусы заказов

вает взаимосвязь между операциями по сборке. Пользователь может выбрать любую операцию и с помощью метода «drag&drop» перетащить ее с одного работника на другого, объединить или разделить операции, скорректировать план по событию, что вызовет соответствующую автома-

тическую цепь изменений во всем плане. Если работник не имеет достаточных навыков для выполнения операции, в случае задержек или других проблем система выделит эту операцию красным цветом и выдаст предупредительное сообщение пользователю.



■ Рис. 5. Результаты планирования по цеху

Первые результаты внедрения в ОАО «Кузнецов»

Система «Smart Factory» внедрена в ОАО «Кузнецов» — одно из крупнейших российских предприятий по сборке и ремонту авиационных и ракетных двигателей. В качестве пилотного выбран важнейший для предприятия цех № 18, отвечающий за сборку сложных компонент, таких как турбостартеры. Ожидаемые результаты внедрения:

- увеличение производительности цеха на 5—10 % (в зависимости от месяца) с тем же количеством ресурсов;

- быстрый переход от бумажных документов к цифровым технологиям управления цехом;

- подъем прозрачности производственных процессов до 95 % с целью обеспечить более эффективное использование ресурсов и их контроль;

- полная автоматизация процессов планирования и координации для повышения производительности управленческой работы цеха;

- интегрирование с существующей на заводе ERP-системой, в которой рассчитывается заработная плата работников с анализом плана-факта, имеется информация по материально-техническому снабжению и т. д.;

- обеспечение быстрой реакции на непредсказуемые события (новый заказ, поломка обо-

рудования и т. д.) в целях автоматического обновления плана цеха в зависимости от возникающих событий так, чтобы он становился более реалистичным и мог быть использован для прогнозирования «узких мест» в заказах по отношению к ресурсам;

- индивидуальное планирование всех ресурсов и заказов;

- уменьшение негативного человеческого фактора (приписки, ошибки и т. д.) и повышение позитивного за счет более гибкого, надежного, правильного и точного процесса принятия решений;

- значительное сокращение сложности в управлении ресурсами цеха (сейчас ежедневные задачи для сотрудников делаются вручную).

По оценке топ-менеджмента завода, главным результатом проекта должно стать достижение полной прозрачности при планировании ресурсов в цехе. Это позволит увеличить эффективность использования ресурсов и соблюдать сроки работ по заказам за счет своевременного выявления всех «узких мест» и быстрого на них реагирования в режиме реального времени.

Ожидается, что экономия от перехода к управлению в режиме реального времени обеспечит полный возврат инвестиций примерно за 1,4 года.

Заключение

Интеллектуальная система «Smart Factory» обеспечивает поддержку принятия решений для управления ресурсами в режиме реального времени, что помогает улучшить качество и обеспечить соблюдение заданных сроков выполнения работ, а также снизить затраты и уменьшить риски.

На следующем этапе развития системы планируется разработка адаптивной p2p сети мульти-агентных планировщиков, функционирующих

в реальном времени и взаимодействующих друг с другом с помощью шины данных предприятия, в целях поддержки высокой производительности, масштабируемости, гибкости и надежности работы системы.

Предлагаемый подход может быть также эффективно использован для решения задач моделирования производственных процессов в реальном времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № ГК 07.524.12.4022.

Литература

1. **Handbook** of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis / J. Y.-T. Leung (ed.) // CRC Computer and Information Science Series. – Chapman & Hall, 2004. – 1120 p.
2. **Vos Stefan**. Meta-heuristics: The state of the Art. Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (ed.) // ECAI 2000 Workshop, Germany. Springer-Verlag, Oct. 2001. Vol. 2148. N 29. P. 1–23.
3. **Skobelev P. O.** Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application // Proc. of 10th

Intern. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011), France, 2011. Springer-Verlag, 2011. P. 5–14.

4. **Skobelev P.** Bio-Inspired Multi-Agent Technology for Industrial Applications, Multi-Agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications / Faisal Alkhateeb, Eslam Al Maghayreh and Iyad Abu Doush (ed.). InTech, Austria, 2011. P. 495–522. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/bio-inspired-multi-agent-technology-for-industrial-applications> (дата обращения: 10.06.2013).