

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Дарья Казанская¹, Ярослав Шепилов¹, Bjorn Madsen²

¹ООО «НПК «Разумные решения»

Московское шоссе 17, Самара, Россия

{kazanskaya, shepilov}@smartsolutions-123.ru

²Multi-agent technology Ltd.

3 Ashbourne Close, London, UK

bm@multiagenttechnology.com

Ключевые слова: адаптивное планирование, мелкосерийное производство, ввод в производство новых продуктов, мультиагентные технологии, управление производством.

Abstract

Currently the methodology of eliminating the negative effects of the issues in ramp-up stage mostly involves the increase in investment and updating the design data. In the paper the authors consider an approach that can be applied on every level of ramp-up production: from suppliers to shopfloor operators. The architecture of the system is described and the first implementation results are given.

Введение

Ввод в производство новой продукции является характерным этапом современных предприятий, поскольку для того чтобы отвечать требованиям рынка, часто разрабатываются и внедряются новые продукты. Основная сложность управления производством на данном этапе состоит в том, чтобы справиться с непредвиденными событиями и при этом увеличить объем производства в короткие сроки. В данном контексте, производство, как правило, оперирует планами на определенный период (обычно на месяц, или в лучшем случае, на день).

Однако такой идеальный план редко соответствует реальности. На самом деле, на его выполнение влияет ряд непредвиденных факторов:

- 1) сбои в работе поставщиков (в том числе, несоответствие требованиям, отсутствие доставки деталей и задержка доставки);
- 2) переоценка производительности труда;
- 1) непредвиденное время, затраченное на принятие решений;
- 2) срочные дополнительные заказы.

Поскольку план не изменяется после запуска в производство, отсутствие возможности настроек становится причиной увеличения количества невыполненных заказов. Для последующих периодов (неделя, месяц, год) это воздействие накапливается. Основная задача управления, в связи с этим, состоит в том, чтобы увеличить производительность и систематически устранять задержку заказов.

Несмотря на понимание этого, современные системы планирования производства все еще склонны использовать традиционные методы, не отражающие окружающие условия, которые меняются практически каждую секунду [1].

Попытка осветить типичные проблемы ввода в производство новой продукции вместе с цепочкой поставок была предпринята в проекте Адаптивного управления производством (ARUM) в 7-ой Рамочной Программе Европейского союза. Подход, рассматриваемый в дан-

ном проекте, описан в нескольких работах [2,3] и основан на сочетании использования мультиагентного планирования для решения проблемы непредвиденных изменений в планировщике, онтологии для сбора и хранения информации о предметной области и интеллектуальной сервисной шине предприятия для обеспечения взаимодействия между различными модулями.

В первом разделе статьи описывается текущий производственный процесс одного из промышленных партнеров данного проекта (Iacobucci Holding Ferentino, IHF). Во втором разделе выделяются основные производственные проблемы. Третий раздел характеризует архитектуру системы ARUM. В четвертом разделе описывается, как система реагирует на основные трудности, а в пятом представлены результаты экспериментов.

1 Исследуемый производственный процесс

Исследование, рассматриваемое в проекте ARUM, охватывает производство (включая тестирование, склад и управление), связано с разработкой, финансами, снабжением и логистикой IHF. В центре исследования находится производственная сфера, которая разделяется на несколько направлений производства по типам продукции:

- 1) Кофе-машины и эспрессо-машины, которые являются наиболее популярными продуктами. Сборочные линии данных продуктов взаимозаменяемы, в том числе и их операторы, которые могут использовать один и тот же набор навыков.
- 2) Уплотнители мусора, которые представляют собой дорогостоящий продукт для долговременного использования. В настоящее время спрос на уплотнители мусора меньше, чем на кофе-машины, но профиль заказов более изменчивый.
- 3) Индукционные нагревательные элементы – более известные как термостаты – представляют не так давно внедренный продукт, на который в настоящее время наблюдается увеличение спроса. Термостаты производятся в относительно медленном темпе, обладая при этом потенциалом увеличения производительности при внедрении системы ARUM.

Производство IHF включает в себя 8 задач:

- 1) Технологическое проектирование предоставляет спецификации для производства и поставщиков, например, инструкции по сборке, чертежи и т.д.
- 2) Снабжение отвечает за контракты с поставщиками и заказ деталей, необходимых для оснащения производственных линий.
- 3) Обслуживание клиентов осуществляет коммуникацию с клиентами и проводит обзор запланированных и прогнозируемых заказов.
- 4) Производственное планирование составляет расписание производства, по которому все работают (от снабжения до отправки сертифицированных продуктов). Производственное планирование взаимодействует с обслуживанием клиентов, для того чтобы удостовериться, что клиенты осведомлены о результатах.
- 5) Входной контроль на складе отвечает за получение и проверку поставок и сообщает, если детали доставлены в недостаточном количестве, отсутствуют, имеют брак или каким-либо еще образом не соответствуют требованиям.
- 6) Комплектация и упаковка формирует сборочные комплекты, которые используются на производственных линиях.
- 7) Производство гарантирует сборку в соответствии с сертифицированными процессами.
- 8) Контроль качества – тестирование всей продукции перед отправкой клиенту. Финальный контроль качества взаимодействует с отделом управления качеством разработки продукции, который занимается исследованием любых несоответствий сертифицированных процессов и обратной связью по развитию производства.

Информация о заказах, спецификациях и инвентарных ведомостях хранится и обрабатывается в базе данных AS400 собственной разработки. Вся информация обрабатывается в документах офисного пакета (PDF, Excel).

Система ARUM влияет на процесс «заказ-доставка». В связи с этим, необходимо понять последовательность действий, когда система ARUM может способствовать увеличению производительности в период ввода в производства нового продукта. Данный процесс изображен ниже (Рис.1):

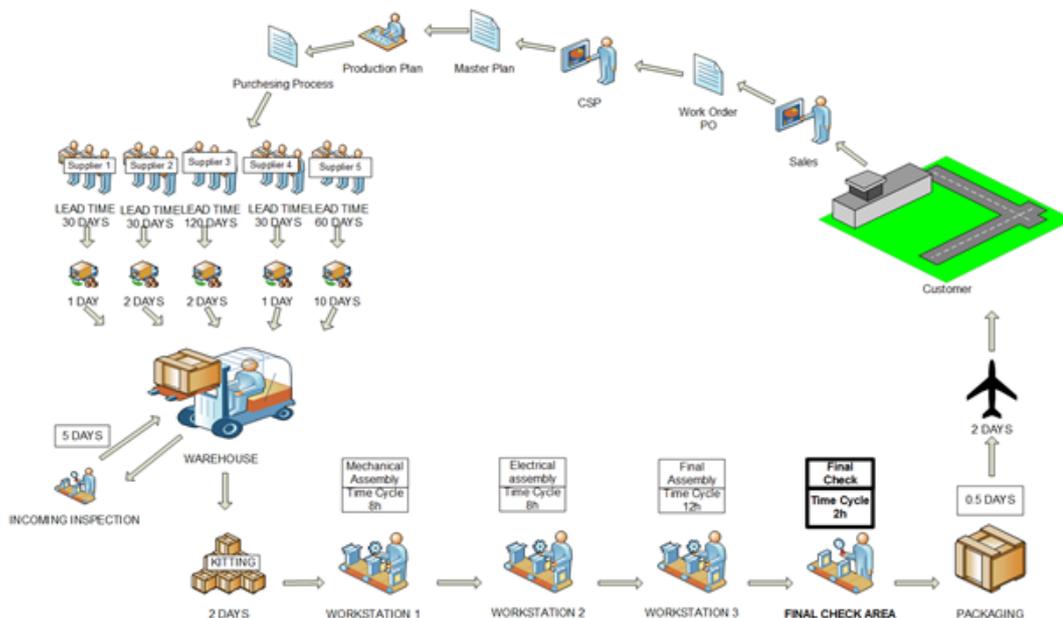


Рисунок 1 – Процесс «заказ-доставка» на предприятии INH

Обработка нового заказа начинается, когда отдел по работе с клиентами получает заказ с указанной датой доставки. Заказы варьируются по количеству, частоте и содержанию продуктов. Как правило, заказы поступают за 90 дней, чтобы предприятие успело получить детали от поставщиков и доставить продукт клиенту. Некоторые клиенты делают долгосрочные заказы, чтобы организовать периодическую доставку продукции в течение года, другие же уведомляют о доставке за 45 дней. Ключевой приоритетный критерий – поставляется ли заказ для совершенно нового самолета или для замены компонентов старых воздушных судов, поскольку задержка доставки для новых самолетов влечет за собой задержку доставки самого самолета в целом, что, соответственно, недопустимо. В обоих случаях отдел по работе с клиентами является главным пунктом анализа коммерческих приоритетов и оценки последствий любых изменений, о которых менеджеры по работе с клиентами сообщают в короткий срок.

Возможность своевременного выполнения заказа сверяется с другими отделами (проверка производственных возможностей, производительности, поставки необходимых деталей и т.д.), которая в итоге утверждается генеральным директором и вносится в базу данных AS400 как утвержденная заявка, требующая включения в производственные планы. Производство координируется на самом высшем уровне с привязкой к общему плану, отдел планирования производства предоставляет детализированный производственный план, в котором разъясняется, какая продукция должна быть произведена к концу месяца на уровне серийных номеров, включая все единицы, производимые «на склад». Данный план затем группируют в наряды, отражающие количество продуктов, которые может произвести в неделю одна сборочная линия. Затем каждый заказ-наряд направляется на сборочные линии, согласно типу продукции, для производства которого сертифицирована данная линия. Запуск наряда во все отделы явля-

ется поводом для набора персонала, закупки деталей отделом снабжения, оснащения сборочных линий и т.д.

Материальный поток логичен: закупаемые материалы получают, проверяют, отправляют на хранение, собирают в комплекты, используют на сборочной линии, тестируют, маркируют для отслеживания, упаковывают в паллеты и отправляют клиенту.

Отдел производственного планирования еженедельно предоставляет отчет о результатах, который является обязательным условием регулярных совещаний руководителей, в то время как отделы ежедневно напрямую производят диагностику и устранение неполадок в работе.

2 Основные проблемы производства

Исходя из анализа процессов ИИФ и опросов сотрудников, был выявлен широкий круг проблем, препятствующих эффективности на стадии ввода в производство новых продуктов. На пути «планирование-производство-доставка клиенту» наибольшее значение имеют следующие непредвиденные события (следуя последовательности процесса «заказ-доставка»):

- 1) Отдел продаж и работы с клиентами:
 - Дополнительные заявки. Примером является срочный заказ крупной авиакомпании на доставку около 100 уплотнителей мусора в течение четырех месяцев (при запланированной возможности выпуска 140 единиц продукции в год). При необходимости производства большого объема продукции в короткий срок нужно решить две проблемы:
 - Перераспределение ресурсов. Заявка на один тип продукции может потребовать перемещения операторов с линий, производящих другой тип продукции. Если ресурсов по-прежнему не хватает, дополнительной производительности можно добиться путем привлечения офисных служащих, которые прошли необходимую сертификацию или персонала с линии 45 Европейского агентства по авиационной безопасности (EASA), который, в основном, осуществляет обслуживание элементов, контролируемых этим агентством.
 - Соблюдение сроков доставки. Очевидно, что сроки доставки уже имеющихся заказов должны быть соблюдены как можно более точно. Однако если нет возможности предотвратить нарушение сроков, заказы следует запланировать таким образом, чтобы сократить штрафные санкции. Новое время доставки должно быть обговорено с клиентом.
 - Проблемы с контрактами (поставщики и клиенты): Цены основаны на годовом количестве деталей, позволяющем поставщику эффективно осуществлять свою деятельность, но объемы, заказанные отделом снабжения, не делятся на партии, подходящие поставщику для доставки. Это приводит к недостатку или переизбытку поставок.
 - Обновления по заказам. Изменения сроков доставки или необходимого количества продуктов, отмена заказов вызывают изменения, которые приводят к совершенно новому расписанию доставок на текущий период. Это влечет за собой проблемы с поставками материалов и влияет на сроки доставки других заказов.
 - Обновления по прогнозам. Когда прогноз неверный, от клиента приходит заявка на дополнительное количество продуктов. Обычно компания может выполнить заявку, если дело касается 2-3 продуктов. Однако дополнительные заказы должны быть утверждены складом, отделом снабжения и отделом производства.
- 2) Производственное планирование. Производственное планирование занимается ежедневными обновлениями производства и продаж. Все данные собираются вручную, обычно путем переговоров и телефонных звонков. Затем план должен быть вручную обновлен в Excel.
- 3) Снабжение:

- Задержка доставки. Несмотря на то, что заказы на поставку деталей обговариваются за год, поставщики со своей стороны могут иметь проблемы, что вызывает нарушение установленных сроков.
- Брак. Детали, полученные от поставщика, могут отличаться от заданного проекта вследствие производственных дефектов или несоответствия проектных данных, переданных поставщику, что приводит к недостатку продукции на складе
- 4) Входной контроль. Материалы не соответствуют чертежам и инструкциям, предоставленным отделом проектирования. Входной контроль является потенциальным узким местом, поскольку нет возможности узнать, доставлены материалы или нет и соответствуют ли они требованиям до тех пор, пока они не пройдут входной контроль. Следовательно, любая крупная проблема с привлечением персонала по входному контролю может вызвать задержку доставки материалов на производство.
- 5) Склад: работники склада выявляют потребность в определенных деталях, только когда начинают формировать сборочные комплекты.
- 6) Производственная линия:
 - Производственные возможности. В случае ИНФ, в первую очередь ожидаемы проблемы с поставками. Тем не менее, эта выгодная с точки зрения стоимости и качества технология может быстрее вызывать новые заявки, чем планируется в данный момент. Типичной проблемой при вводе в производство новой продукции является следующая ситуация. Входной контроль проверяет соответствие детали чертежу (который обычно представлен на бумажном носителе, а также доступен в электронном виде в общей папке). Если электронный вариант в этот момент меняется или обновляется, то детали уже не соответствуют чертежу. Это приводит к тому, что детали, которые были проверены по старым инструкциям, следует перепроверять в соответствии с новыми инструкциями.
 - Брак: Инструкция по сборочной линии отличается от реальных материалов. Брак может привести к непригодности части продукции. Кроме того, иногда для принятия решения по поводу бракованных изделий требуется согласование нескольких отделов предприятия.
 - Неполные сборочные комплекты. Иногда сборочные комплекты попадают в производство с недостатком некоторых деталей. Это значит, что сборочные узлы не могут быть собраны. Если необходимые материалы не придут до того, как начнется сборка узлов, руководство должно будет решить эту проблему.

3 Система ARUM

Архитектура системы ARUM разработана в контексте стадии ввода в производство новых продуктов, когда есть конфликты между необходимостью контроля и реальностью быстрых изменений. Стадия ввода в производство новых продуктов часто требует непрерывной интеграции, начиная со стратегий и систем, заканчивая уровнем инструментов (т.е. на всех ступенях контроля и оптимизации). Кроме того, нужна вертикальная интеграция от Системы Управления Производством (MES) вплоть до уровня цехов, и горизонтальная интеграция - от проектирования до планирования производственной системы для того, чтобы обеспечить устойчивость процессов государственного производства.

Для решения вышеуказанных проблем и соответствия промышленным требованиям архитектура ARUM интегрирует основные компоненты сервис-ориентированной архитектуры, а также холонических мультиагентных систем и сторонних систем и объединяет их с помощью сервисной шины предприятия (ESB), обеспечивая коммуникацию, мониторинг, взаимодействие и агрегирование информации в существующих сторонних системах на всех уровнях производства с целью обеспечения поддержки автоматического согласования, планирования верхнего уровня, составления расписаний и оптимизации внутри одного предприятия и между несколькими в режиме реального времени. Рассматриваемые технологии распределенной

мультиагентной системы в холонической архитектуре, как ожидается, помогут интеграции сторонних систем, агрегированию информации от систем высшего уровня (MES, ERP и т.д.) до автоматизации на уровне заводского цеха (например, резка металла и сборочные системы). На основании таких требований, отраженных в архитектуре системы, основные функциональные возможности системы ARUM включают в себя составление расписаний, планирование верхнего уровня, управление производством и производственные процессы, поддерживаемые фактической информацией, поступающей из различных источников, таких как сторонние системы, датчики и данные, вводимые пользователями.

На основе конкретных требований заказчика и предметной области, а также результатов предыдущих исследований и внедрения [4,5] логическое представление системы ARUM не только определяет ключевые компоненты и сервисы, которые составляют систему ARUM, но также демонстрирует взаимосвязи между ними, как изображено на Рисунке 2.

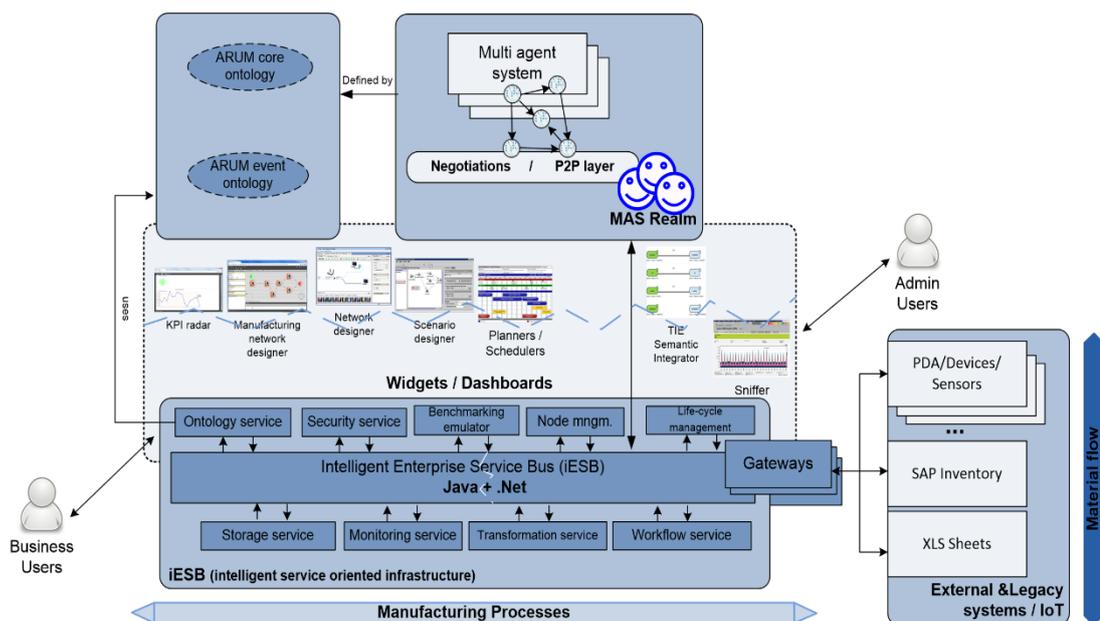


Рисунок 2 – Архитектура системы ARUM

Эта архитектура была более подробно рассмотрена в [6]. В данной же работе мы выделим только ключевые элементы архитектуры для того, чтобы поддержать пример компании IHF:

- шлюзы для извлечения данных из сторонних систем;
- онтология для описания предметной области системы;
- мультиагентный адаптивный планировщик для создания планов производства;
- пользовательский интерфейс для менеджеров производства и планирования: для составления расписания и обеспечения его выполнения;
- пользовательский интерфейс для операторов цехов: для получения задач в соответствии с расписанием, а также сообщения об их выполнении и обнаруженных проблемах.

4 Применение системы ARUM

Как было показано в предыдущем разделе, система ARUM охватывает большинство аспектов работы предприятия благодаря своей структуре и архитектуре. Чтобы дать читателю

более четкое представление, рассмотрим проблемы, которые были выделены выше, и опишем, как система их решает.

В случае дополнительного спроса, полученного отделом по работе с клиентами, решение обеспечивается согласованной работой стратегического планировщика и оперативного планировщика. Стратегический планировщик позволяет менеджерам рассмотреть различные возможные решения (дополнительные линии, изменения в планировке цеха и т.д.) и выбрать лучший с точки зрения прибыли. Оперативный планировщик гарантирует, что средства будут распределены наиболее эффективным образом (чтобы сократить расходы и соблюсти сроки) в рамках условий, установленных руководством.

Проблемы по контрактам с поставщиками и заказчиками решаются с помощью оперативного планировщика, который учитывает не только производственный процесс, но и профиль необходимого запаса. Таким образом, руководство может сделать заказ на поставки в соответствии с потребностями производства, что позволяет устранить дефицит и затоваривание.

Любое изменение в заказах или прогнозах, которое отражается в одной из сторонних систем (Excel или AS400), тут же обрабатывается оперативным планировщиком, который обновляет текущий план производства.

Вопросы планирования производства решаются с помощью автоматических обновлений в плане, осуществляемых оперативным планировщиком, что позволяет сократить время коммуникации между отделом планирования производства и другими отделами. Вместо того, чтобы обновлять многочисленные таблицы, менеджер по планированию может сосредоточиться на обеспечении требуемых ключевых показателей эффективности (KPI) путем корректировки свойств планирования.

Если необходимый запас не был предоставлен поставщиком вовремя или был поставлен в недостаточном количестве, оперативный планировщик укажет на эту проблему и перераспределит ресурсы соответствующим образом.

Оперативный планировщик может расставить приоритеты фактического порядка при входном контроле, таким образом, персонал будет знать, какие детали должны быть обработаны в первую очередь. Работа операторов входного контроля может быть распланирована так же, как работа операторов производства, в то время как эти два отдела и их планировщики могут общаться с помощью р2р («равный с равным») сети. Более того, когда проблема обнаружена на складе, оперативный планировщик может перераспределить ресурсы.

Что касается производственной линии, операторы с помощью своих планшетов с установленным пользовательским интерфейсом следят за тем, чтобы все сотрудники имели доступ к обновленным техническим данным, которые актуализируются автоматически, когда новый продукт назначается на линию. Время на переоборудование линии сокращается, тем самым делая производство более гибким. Пользовательский интерфейс оператора также помогает сообщить о проблеме без оформления документации. Отчет может быть впоследствии получен руководством и использован в процессе решения проблем, в то время как планировщик будет перераспределять ресурсы для предотвращения простоя. В случае неполных сборочных комплектов оперативный планировщик может ставить в расписание операции текущей партии до тех пор, пока материалов в комплектах достаточно. Затем будут запланированы операции из следующей партии для предотвращения простоя.

Кроме того, система ARUM может обеспечить поддержку в применении принципов бережливого производства, выделяя узкие места и реагируя на события и полученную информацию. Система сокращает время, затрачиваемое на коммуникацию между отделами, а также количество соответствующей бумажной работы путем предоставления пользовательских интерфейсов для всех ролей, имеющих отношение к процессу.

5 Результаты

В данной работе рассматривается влияние системы ARUM на производственные процессы на предприятии IHF с помощью следующей серии экспериментов:

- Фактический сценарий. Описывает работу IHF, основываясь на данных, предоставленных за 2013 год.
- Идеальный сценарий. Предполагается, что все заказы известны заранее, и они планируются наиболее эффективным образом.
- Реалистичный сценарий. Заказы принимаются по данным 2013 года и планируются эффективным образом.

Принимая идеальный сценарий в качестве наилучшего примера, мы будем использовать его ключевые показатели эффективности для измерения двух других сценариев.

Рассмотрим более подробно показатели, представленные в таблице. Производительность рассчитывается следующим образом:

$$(1) N = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{output}}{Q_{pt} + Q_{empl}}$$

где Q_{output} – выход единиц в евро, Q_{pt} – затраты на деталь в евро, Q_{empl} – затраты на сотрудников в евро.

Задержки рассчитываются следующим образом:

$$(2) D = T_{actual} - T_{contract}$$

где T_{actual} – фактическая дата поставки, $T_{contract}$ – дата поставки по контракту.

Коэффициент использования ресурсов вычисляется следующим образом:

$$(3) U = \frac{\sum_{i,k} j_{i,k}}{N_r \cdot (t_2 - t_1)}$$

где $j_{i,k}$ – продолжительность конкретной работы, N_r – количество ресурсов, t_1, t_2 – начало и конец рассматриваемого интервала времени.

Исходные предположения по ресурсам на основе матриц навыков и данных, предоставленных представителями IHF, были рассмотрены в ходе оценки, представленной в Таблице 1.

Таблица 1 – Данные, используемые в тестах

Продукт	Количество линий	Количество операторов на линию	Общее количество единиц продукции за 2013	Производство заказа в человеко-часах	Стоимость оператора за час, €	Стоимость деталей единицы продукции, €
CM	4	2	768	20	6	679,5
TC	1	4	200	35,68	6	4737,8
IHU	1	2	12	61,07	6	5615

В ходе экспериментов для каждого из трех сценариев, описанных выше, было составлено расписание на период одного года. Результаты приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментов

Сценарий	Производительность	Задержки в днях			Коэффициент использования ресурсов, %
		Мин.	Макс.	Среднее	

<i>Фактический сценарий</i>	1,45	01	434	32,5	99
<i>Идеальный сценарий</i>	1,47	0	287	0	70
<i>Реалистичный сценарий</i>	1,47	0	363	0	67

Незначительное увеличение производительности в идеальном и реалистичном сценариях достигается за счет снижения штрафов, выплачиваемых за задержки выполнения заказов. Этот показатель может быть увеличен путем принятия дополнительных заказов (по сравнению с данными за 2013 год).

Коэффициент использования ресурсов снижается в идеальном и реалистичном сценариях за счет более эффективного планирования. Это означает, что новые заказы могут быть приняты для достижения полной загрузки. Тем не менее, компания может захотеть сохранить тот же уровень потребительского спроса, но при этом уменьшить или перераспределить ресурсы. Еще одна возможность для эффективного использования мощности – это выполнение внешних заказов.

Эффективное планирование привело к сокращению задержек поставок заказов, таким образом, уменьшая штрафы, выплачиваемые заказчикам.

Заключение

Результаты эксперимента показывают, что улучшение координации в планировании может привести к сокращению задержек поставок заказов и свободной мощности. Это означает, что, несмотря на потенциальное влияние непредвиденных событий, предприятие может принимать дополнительные заказы или ликвидировать задолженности по заказам за предыдущие годы. Таким образом, применение системы ARUM дает возможность увеличить прибыль компании с тем же количеством ресурсов

Более того, эксперименты показали, что общение с клиентами играет важную роль, так как производительность компании зависит не только от производства, но и от дат, в которые были размещены заказы на поставку. Это открывает широкие возможности для дальнейших экспериментов и исследований.

Благодарности

Научные исследования, приведшие к этим результатам, получили финансирование от Седьмой Рамочной Программы FP7/2007-2013 Европейского Союза в рамках соглашения о субсидировании №314 056.

Список литературы

- [1] P.Skobelev. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry (Invited Chapter)*. – Elsevier. – 2014. (in publishing).
- [2] Paulo Leitão, José Barbosa, Pavel Vrba, Petr Skobelev, Alexander Tsarev, Daria Kazanskaia. “Multi-agent System Approach for the Strategic Planning in Ramp-up Production of Small Lots”. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013)*, October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4743-4748.
- [3] Alexander Tsarev, Daria Kazanskaia, Petr Skobelev, Sergey Kozhevnikov, Vladimir Larukhin, Yaroslav Shepilov. “Knowledge-driven adaptive production management based on real-time user feedback and on-

¹ Пожалуйста, обратите внимание, что нулевое значение означает на самом деле отрицательную задержку (т.е. опережение в производстве), однако в данном случае мы просто предполагаем, что задержки нет, и заказ был поставлен вовремя, независимо от того, насколько ранее установленного срока.

- tology updates". Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4755-4759.
- [4] Paul De Bra, Lora Aroyo, and Vadim Chepegin. "The next big thing: Adaptive web-based systems." Journal of Digital Information 5.1 (2006).
- [5] Vadim Chepegin, Ferando Perales, Silvia de la Maza. "CREATE Software architecture", <https://itea3.org/project/workpackage/document/download/862/10020-CREATE-WP-2-D21Architecture.pdf> (2012).
- [6] Cesar Marin, Lars Moench, Paulo Leitao, Pavel Vrba, Daria Kazanskaia, Vadim Chepegin, Liwei Liu, Nikolay Mehandjiev. "A Conceptual Architecture Based on Intelligent Services for Manufacturing Support Systems". Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4749-4754.