

*На правах рукописи*

**Вожаков Артем Викторович**

**БИЗНЕС-ПРОЦЕССЫ, МОДЕЛИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ  
В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Пермь 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный консультант: **Столбов Валерий Юрьевич**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бурковский Виктор Леонидович**,  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электропривод, автоматика и управление в технических системах»

**Калянов Георгий Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук», главный научный сотрудник лаборатории № 49 «Инфраструктурных систем»

**Сараев Павел Викторович**,  
доктор технических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», профессор кафедры «Автоматизированные системы управления»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится 19 сентября 2024 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.21 на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, дом 29, аудитория 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://www.pstu.ru>).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

\_\_\_\_\_ /А.О. Алексеев/

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования** определяется следствиями стремительного развития технологий, постоянных изменений внешней среды и началом третьей промышленной революции. Все эти факторы определили реальность, которую характеризует нестабильность, неопределенность, сложность и неоднозначность. Устоявшиеся системы связей нарушаются, во всех областях жизнедеятельности человека произошедшие изменения вызвали массу проблем, для решения которых, как правило, на данный момент не существует теоретической базы и практических инструментов решения. Для того, чтобы быть конкурентоспособным в современном мире производственные компании должны предложить клиентам: постоянно обновляющийся ассортимент продукции, производство продукции под требования клиента минимальными партиями, сжатые сроки производства, частые изменения в портфеле заказов клиентов, частую смену поставщиков. Существующие инструменты управления производством в качестве модели производственной системы рассматривают предприятия со стабильными потоками заказов, производственными процессами, во главу угла ставя снижение затрат за счет операционной эффективности. В современных условиях данные инструменты перестали выполнять поставленные перед ними задачи. Необходимы новые инструменты управления производством, лишенные ограничений, которые диктуют системы прошлого поколения. Такие системы должны позволить обеспечить максимально-гибкую и при этом результативную работу производства в условиях постоянных изменений в портфеле заказов, изменчивой ситуации на производстве, недостаточности информации.

Диссертация направлена на системное решение важной народно-хозяйственной проблемы: повышению эффективности систем управления промышленным производством за счет перехода на цифровые интеллектуальные технологии, разработки и внедрения импортонезависимых программных решений и открытых программных платформ в условиях введения внешних ограничений на использование зарубежных проприетарных решений. Результаты исследований, изложенные в диссертации, соответствуют приоритетным направлениям научно-технологического развития России, в частности, «переходу к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, созданию систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта». Решаемые практические задачи позволяют значительно повысить эффективность и результативность производственных процессов за счет использования методов интеллектуального управления производством в условиях постоянно меняющихся внешних условий обрабатывая большие объемы данных в режиме реального времени с использованием машинного обучения и искусственного интеллекта, основываясь на лучших мировых практиках оптимизации производственных процессов. Также представленные результаты создают возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и технологий за счет решения сложных задач управления производством и принятия решений в условиях больших объемов информации разной степени достоверности и необходимости учета множества ограничений и изменений.

**Степень научной разработанности проблемы.** За рубежом проблемам управления производством и, в частности, автоматизированным системам управления производством посвящено множество монографических работ и статей. Среди них особо следует отметить практические работы таких зарубежных ученых, как: Н. Гейтер, Р. Менджи, Д. Ригби, Х. Такеда, Дж. Вомак, Э. Голдратт, Р. Сури, А. Дитон и многих других. В нашей стране вопросами автоматизированного управления промышленным предприятием в современных условиях занимались такие ученые как Н.И. Аристова, Н.Н. Бахтадзе, О.В. Логиновский, А.В. Голлай, В.Л. Бурковский, М.Б. Флек, Е.А. Угнич, П.В. Сараев, Г.С. Гун и многие другие.

Работы Б. Сильвера, Н.М. Капустина, Г.Н. Калянова, В.В. Репина, С.В. Маклакова, С.В. Черемных, И.О. Семенова, В. С. Ручкина посвящены моделированию бизнес-процессов компании в различных нотациях (IDEF, EPS, BPMN и другие), предлагаются методы изучения,

анализа, реинжиниринга и повышения эффективности бизнес-процессов компании. Данные подходы создают базу для рассмотрения производственных предприятий как сложные системы процессов и связей.

Существующие практики управления производственными системами были разработаны такими учеными, как Т. Оно, Дж. Вумек, Дж. Лайкер, Э. Голдратт, Э. Деминг, У. Детмер, Д. Фогарти, Р. Сури. В работах этих авторов излагаются подходы к организации и управлению производством, в т.ч. бережливое производство (концепция управления производственным предприятием, основанная на постоянном стремлении к устранению всех видов потерь), теория ограничений (методология менеджмента, в основе которой лежит нахождение и управление ключевым ограничением системы, которое предопределяет эффективность всей системы в целом), быстро реагирующее производство (управленческая концепция, нацеленная на радикальное сокращение временных затрат на всех этапах производственного цикла и офисных операций). Применение таких практик осложнено необходимостью длительного обучения и повышения квалификации управленческого и производственного персонала и сложностью применения в условиях постоянных изменений.

Особенно детально в литературе раскрыты вопросы использования различных классов систем управления производством. Такие авторы, как Дж. Кокс, Н. Гайвер, Д. Браун, А.В. Гаврилов, Д. В. Фогарти, Дж. Х. Блэкстоун, Т. Р. Хоффманн, Р. Гудфеллоу, Д. Грин рассматривают концепцию планирования ресурсов предприятия (ERP), базирующейся на планировании потребности в материальных ресурсах (MRP). Данные подходы нашли широкое применение в практике управления предприятиями как за рубежом, так и в Российской Федерации. Данный класс систем по-прежнему является надежной платформой, в том числе для построения перспективных систем управления. Следует отметить, что сложность и стоимость внедрения таких систем постоянно увеличивается, а положительные эффекты от их использования постоянно снижаются за счет невозможности быстрой адаптации процессов и инструментов управления к быстроменяющимся внешним условиям.

Работы Р. С. Линг, У. Э. Годдард, Дж. Бермудеса, Н. Мейер, Ф. Фукс, К. Тили посвящены концепциям асинхронного планирования цепей поставок (APS) и детальному планированию производственных операций (MES). Предложенные подходы базируются на сложных математических моделях, позволяющих перепланировать производство и цепи поставок в режиме реального времени, учитывая множество параметров планирования и детальную информацию о ходе производства. Однако применение таких систем на практике является крайне сложным за счет предельно высоких требований, которые предъявляют системы к объему и качеству и актуальности нормативно-справочной информации, используемой в алгоритмах программных решений.

Влиянию на процессы производства индустрии 4.0 посвящены работы Л. Кунья, М. Херманн, Т. Пентек, Б. Отто, У. Эберл, Й. Пума, Д. Левин, В. Малюх, Т. Уиреман, детально описано использование инструментов индустрии 4.0 для построения безбумажного цифрового производства.

Наконец концепциям интеллектуальных систем управления и теории коллективных решений в условиях нечеткой исходной информации посвящены работы таких ученых как О.П. Кузнецов, Р.Х. Талер, Ф.Т. Алескеров, Ф.Ф. Пашенко, Г.С. Вересников, Н.Н. Бахтадзе, М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов, Р.А. Файзрахманов и др. В работах отмечается несовершенство когнитивных механизмов принятия решений, приводятся постулаты теории ограниченной рациональности и особенности взаимодействия двух типов когнитивных процессов (быстрых и медленных), сформулирована проблема принятия коллективных решений на основе большого объема информации разного качества и достоверности. Изложены парадокс голосования, подходы к решению проблем управления в слабоструктурированных системах на основе метода анализа когнитивных карт (как линейных, так и нечетких), методы структурирования проблемных ситуаций и методы составления и верификации когнитивных карт. Детально изложена общая концепция интеллектуальных систем на основе нечеткой когнитивной модели, содержащая подсистему объяснения прогноза и подсистему принятия решений. Применение на практике предложенных подходов на сегодняшний день сильно ограничено и требует

исследований в части проверки прикладной адекватности различных моделей в различных предметных областях, моделированию конфликтных ситуаций и моделированию развития и управления в условиях ограниченности ресурсов. Все это требует системного подхода в обработке информации и разработке методов поддержки принятия решений, позволяющих повысить эффективность и скорость принятия решений в условиях нечетких исходных данных и критериях оптимальности.

**Объектом исследования** является система управления сложным мелкосерийным производством.

**Предметом исследования** являются механизмы и модели планирования и управления сложным мелкосерийным производством, а также процессы поддержки и принятия управленческих решений.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является разработка теоретических основ поддержки принятия решений и повышение эффективности управления мелкосерийным производством за счет разработки концепции и практической реализации интеллектуальной системы управления с использованием опыта создания автоматизированных систем управления, моделирования бизнес-процессов и лучших практик построения и оптимизации производственных процессов.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- Систематизировать теоретические основы и мировой опыт управления современным производственным предприятием в условиях быстроменяющейся конъюнктуры рынка продукции, подходы к разрешению проблем управления сложными производственными объектами.
- Провести структурный анализ и декомпозицию производственной системы, разработать унифицированную модель бизнес-процессов.
- Разработать концепцию интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством с использованием существующих информационных систем и лучших практик управления производственными системами.
- Определить и проанализировать основные задачи, решаемые в рамках интеллектуальной системы управления производством.
- Разработать эффективные механизмы и алгоритмы решения интеллектуальных задач управления с применением методов математического и имитационного моделирования, основанных на знаниях и нечеткой логике.
- Реализовать на практике интеллектуальную систему управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства.
- Апробировать разработанную интеллектуальную систему управления промышленным предприятием в условиях реального производства.

**Научная новизна диссертационного исследования в целом** состоит в разработке и реализации интеллектуальной системы управления производственным предприятием, базирующейся на существующих ERP-решениях, лучших практиках организации производственных процессов и расширенном применении методов искусственного интеллекта, включая:

1. Разработку новой концепции интеллектуальной системы управления промышленным предприятием, отличающейся учетом лучших практик организации производства и применением методов искусственного интеллекта при решении задач управления, а также встроенной экспертной системой поддержки принятия решений.
2. Новую постановку и метод решения многокритериальной задачи календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала в условиях нечеткой исходной информации, отличающаяся учетом ограничений на все виды ресурсов и использованием расширенного специального нечеткого множества для построения обобщенного критерия оптимальности плана производства.

3. Новую постановку и метод решения задачи синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства, отличающуюся от частного решения теории быстро реагирующего производства большей универсальностью и расширенным спектром применения на предприятиях за счет отсутствия требований по изменению производственной логистики.
4. Новую постановку и алгоритм решения задачи оптимального управления производством на оперативном уровне с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов, которая отличается крайне низкими требованиями к полноте и качеству нормативно-справочной информации, требуемой для получения рационального решения.
5. Новую постановку и алгоритм задачи поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия, которая отличается учетом специфики предметной области и учету дополнительных ограничений на параметры эффективности производства.
6. Разработку узкоспециализированных эвристических методов и алгоритмов решения интеллектуальных задач управления, отличающихся от известных численных методов оптимизации более высокой скоростью нахождения близких к оптимальным решениям поставленных задач.

**Теоретическая значимость** результатов диссертационного исследования состоит:

- в декомпозиции производственной системы на бизнес-процессы и установке связей между ними;
- в постановке и решении задачи оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала;
- в постановке и решении задачи синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства;
- в постановке и решении задачи оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов;
- в постановке и решении задачи поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия (интеллектуальный анализ и поиск решений).

**Практическая ценность** полученных результатов заключается в:

- разработке алгоритмов и программного обеспечения для решения задачи календарного планирования производства;
- разработке имитационной модели синхронизированного производства;
- разработке алгоритмов и программного обеспечения для решения задачи оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов.
- разработке программного модуля синхронизации производства для 1С ERP;
- практической реализации интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства;
- апробации разработанной автоматизированной интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях реальных производств.

**Методология и методы исследований.** В качестве теоретической основы исследования рассматривались положения системного анализа, теории управления, теории информации и нечетких множеств, поддержки принятия решений, теории проектирования информационных и эргатических систем.

Методологическую основу исследования составили методы системного анализа, информационных технологий и программной инженерии, проектирования информационных систем, эргономического проектирования, математического моделирования, экспертной оценки, методов искусственного интеллекта, имитационного моделирования, планирования эксперимента.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Решение рассматриваемой научной проблемы предполагает научные исследования и технические разработки, включенные в формулу научной специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

- Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта (п.2).
- Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта (п.4).
- Разработка специального математического и программного обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта (п.5).
- Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов (п.9).
- Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах (п.10).
- Методы получения, анализа и обработки экспертной информации, в том числе на основе статистических показателей (п.13).

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Концепция интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством, опирающейся на информационные источники генерируемые и хранимые в автоматизированной системе управления для решения прикладных задач управления производством с использованием лучших практик оптимизации производства.
2. Модель и алгоритм решения задачи оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала.
3. Модель и алгоритм синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства.
4. Модель и алгоритм решения задачи оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов.
5. Модель поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия (интеллектуальный анализ и поиск решений).

**Достоверность** выдвинутых в диссертации положений и выводов обеспечена системным подходом к решению задач оптимального управления производством; опорой на современные методы и средства моделирования и проектирования сложных человеко-машинных систем; корректным использованием данных решения тестовых задачи и подтверждена результатами натуральных экспериментов; внедрением полученных результатов в ряде крупных компаний в рамках проектов разработки и внедрения интеллектуальных систем управления производством.

**Апробация и внедрение результатов диссертационной работы** прошли на промышленных предприятиях ПАО «Мотовилихинские заводы», АО «Редуктор-ПМ», ГК «Содружество» и др. Акты внедрения и справки о практическом использовании результатов исследования приведены в приложении к диссертации.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0005).

Результаты исследований, включённые в диссертацию, докладывались соискателем на 17 международных и отечественных конференциях: 35-я юбилейная международная конференция

молодых ученых «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + S&E '08» 2008; 17-я всероссийская конференция молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках» 2008; 5-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» 2008; 36-я международная конференция «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе IT + S&E '09» 2009; 6-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» 2009; VII Всероссийская школа-конференция «Управление большими системами»; Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем» (14-16 ноября 2011 года, Москва, Россия); Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем – 2011»; IX Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». 2012; Конференция "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах", 2012, Москва; XLI Международная конференция «IT-S&E'2013», Украина, Крым, Ялта- Гурзуф; XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2013 Москва, 16-19 июня 2014г.; Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург. 28-30 октября 2015 г.); XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». Пермь, 2017; Международная конференция «Advances in Digital Science», 19–21 February 2021, Salvador, Brazil. ICADS 2021, on. Advances in Intelligent Systems and Computing 2021; Международная конференция «Digital Science», 15.10.2021, Luxembourg. DSIC-2021; XIX Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». Челябинск, 2022.

#### **Публикации по материалам диссертационной работы:**

2 монографии, 12 статей в изданиях из Перечня ВАК РФ, 4 статьи из БД WoS и Scopus, 23 статьи в других периодических международных и российских изданиях, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 16 материалов докладов на международных и общероссийских научных и научно-методических конференциях.

**Личный вклад автора** в работах, выполненных в соавторстве, заключается в разработке концепции, принципов, моделей, алгоритмов программного обеспечения, разработке программного обеспечения для реализации концепции интеллектуальной системы управления производственным предприятием, апробации и внедрении полученных результатов, оценке и обобщении результатов.

**Структура и объем диссертационной работы:** диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и 5 приложений. Общий объем – 386 стр., из которых: оглавление - 4 стр., основного текста – 349 стр. (таблиц – 36, рисунков – 103), библиография - 31 стр. (247 наименований), приложения – 10 стр.

#### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, методы исследований, практическая значимость, научная новизна и сведения о полученных результатах, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ предметной области и осуществлена постановка задач диссертационного исследования. Промышленное предприятие рассмотрено как как большая и сложная система (производственная система), представляющая собой совокупность иерархии целей, иерархии принятия решений и иерархии бизнес-процессов (внутренние иерархии). Производственная система функционирует в окружении рынков продукции, сырья, труда и инноваций. Производственная система взаимодействует с этими рынками, обмениваясь информацией, материальными и трудовыми ресурсами. Внешней средой для производственной системы также является общество, находящееся на определенном уровне развития, преследующее некоторые цели и взаимодействующее с производственной системой через политические, экономические и социальные институты.

Производственная система вынуждена постоянно адаптироваться к тем изменениям, которые происходят в окружающей ее среде, путем модификации и развития своих внутренних иерархий. В качестве примера производственной системы рассматривается современное



промышленное предприятие, состоящие из совокупности взаимосвязанных сбытовых, производственных и снабженческих подразделений, объединенных единой целью, направленной на выполнение плана производства готовой продукции в заданном объеме и в заданные сроки.

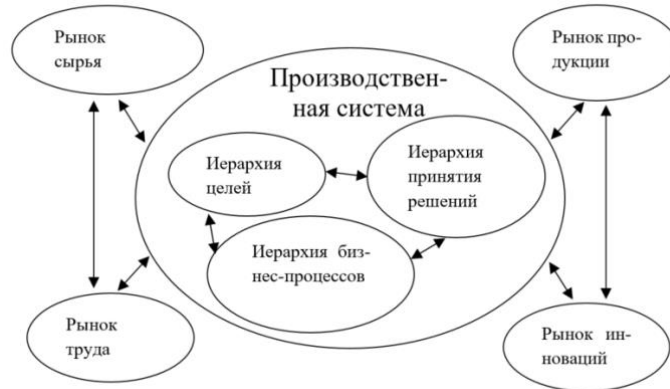


Рисунок 1 – Структурная модель большой производственной системы

Процесс управления производственным предприятием может быть условно разбит на три уровня управления, характеризующиеся собственным набором задач, различными периодами планирования и разным уровнем детализации (таблица 1).

Таблица 1. Предлагаемая классификация уровней управления

Свойства	Стратегический	Тактический	Оперативный
Уровень детализации	Виды продукции	Укрупненные объекты	Номенклатурная позиция
Горизонт	1...5 лет	1...6 месяцев	1...2 дня
Интервал	Месяц	День	Час
Оценка выполнения	Ежеквартально	Еженедельно	Ежедневно

Проведен анализ подходов к описанию и формализации системы управления, декомпозиции системы управления по бизнес-процессам трех видов: управляющие (бизнес-процессы, которые управляют функционированием системы), операционные (бизнес-процессы, которые составляют основную деятельность компании и создают основной поток доходов), обеспечивающие (бизнес-процессы, которые обслуживают основной бизнес). Рассмотрен язык моделирования бизнес-процессов BPMN (англ. Business Process Model and Notation, нотация и модель бизнес-процессов), который используется для повышения эффективности компании. Спецификация BPMN описывает условные обозначения для отображения бизнес-процессов в виде диаграмм бизнес-процессов. Основная цель BPMN — создание стандартного набора условных обозначений, понятных всем бизнес-пользователям.

Параллельно с развитием автоматизированных систем управления, развивались и подходы к организации и управлению производством. Следует выделить четыре наиболее проработанных подхода к организации и управлению производством:

1. Бережливое производство (lean production, lean manufacturing, LEAN) — концепция управления производственным предприятием, основанная на постоянном стремлении к устранению всех видов потерь: перепроизводство; ожидание; ненужная транспортировка; лишние этапы обработки; лишние запасы; ненужные перемещения; выпуска дефектной продукции.

2. Теория ограничений (Theory of Constraints, TOC) — методология менеджмента, в основе которой лежит нахождение и управление ключевым ограничением системы, которое предопределяет эффективность всей системы в целом. Основными инструментами являются: метод «буфер – барабан – веревка»; метод критической цепи.

3. Быстрореагирующее производство (Quick Response Manufacturing, QRM) – управленческая концепция, нацеленная на радикальное сокращение временных затрат на всех этапах производственного цикла и офисных операций. Основными инструментами являются: организация производственных ячеек; стратегия управления материально-техническими потребностями на уровне цеха POLCA.

4. Сетевое производство (Network-Centric Manufacturing, NCM) – управленческая концепция, основанная на децентрализованном подходе управления, предусматривающем формирование самоорганизующихся распределенных систем группового управления на тактическом уровне.

На рисунке 2 представлена сводная диаграмма распределения инструментов и автоматизированных систем управления по уровням управления предприятием.



Рисунок 2 – Сводная диаграмма распределения инструментов и автоматизированных систем управления по уровням управления предприятием

В главе также подробно рассмотрены эволюции интеллектуальных систем управления предприятием, исследованы основные виды автоматизированных систем управления производством актуальные на сегодняшний день:

1. ERP-системы — автоматизированные системы управления, реализующие в себе процессы управления производством, управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами, ориентированные на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия, обеспечивающие общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности предприятия.

2. APS-системы — программное обеспечение для синхронного производственного планирования, главной особенностью которого является возможность построения сквозного расписания работы оборудования в рамках всего предприятия.

3. MES — специализированное прикладное программное обеспечение, предназначенное для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции в рамках какого-либо производства.

4. SCADA — программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. Данные системы относятся к оперативному уровню управления.

5. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) — группа решений технических и программных средств, предназначенных для автоматизации управления технологическим оборудованием на промышленных предприятиях.

Отдельно рассмотрено цифровое предприятие, подразумевающее использование технологий цифрового моделирования (3D) и проектирования как самих продуктов и изделий, так и производственных процессов на всем протяжении жизненного цикла с бесшовной интеграцией систем с системами управления производством, оборудованием с ЧПУ и роботизированными системами.

**Вторая глава** посвящена разработке концепции интеллектуальной системы управления (ИСУ) мелкосерийным производством. Научное и практическое направление исследований и разработки интеллектуальных систем было сформировано в конце 1989 года. Под интеллектуальной системой (ИС) понимается объединенная информационным процессом совокупность технических средств и программного обеспечения, работающая во взаимосвязи с человеком (коллективом людей) или автономно, способная на основе сведений и знаний при наличии мотивации синтезировать цель, принимать решение к действию и находить рациональные способы достижения цели (К.А. Пупков).

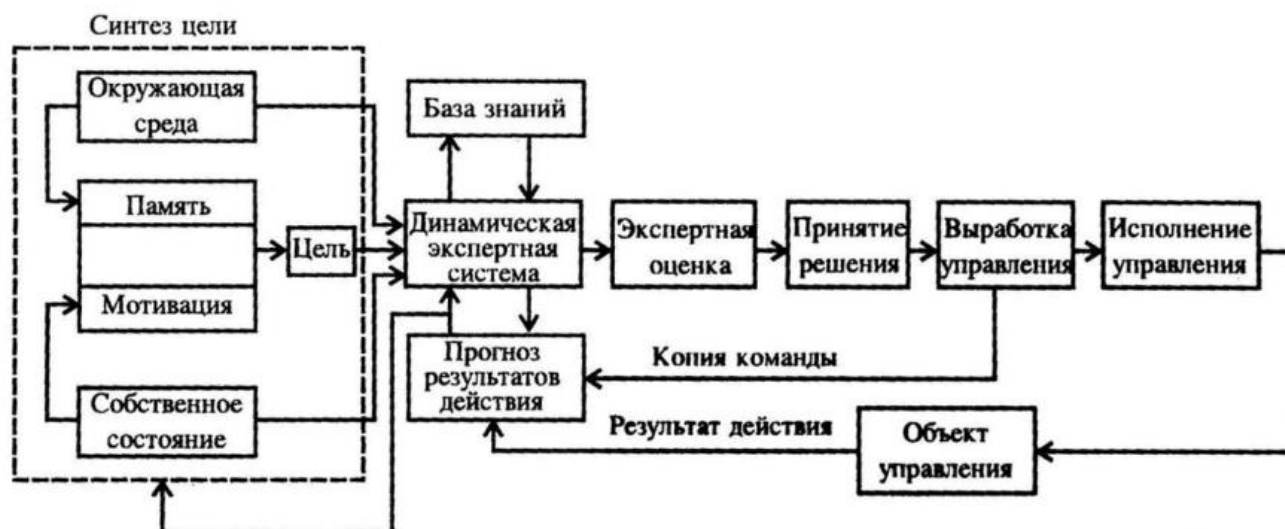


Рисунок 3 – Интеллектуальная система управления

Интеллектуальные системы должны быть способны автономно понимать и контролировать среду путем активного и адаптивного взаимодействия с реальным миром, а также взять на себя часть деятельности человека в этом мире. Таким системам необходимо справляться с неполнотой, неопределенностью и изменчивостью информации, характерным для реального мира. К новым функциям таких систем можно отнести понимание воздействий окружающей среды, моделирование реального мира, планирование последовательности действий, оптимальное управление с целью достижения желаемого результата, элементы адаптации и самоорганизации. Интеллектуальные системы управления (intelligent control systems) – это системы управления способные к «пониманию» и обучению в отношении объектов управления, возмущений, внешней среды и условий работы. Основное отличие интеллектуальных систем – наличие механизма системной обработки знаний. Главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальные системы управления (ИСУ) от «традиционных» – это механизм получения, хранения и обработки знаний для реализации своих функций. В основе создания интеллектуальных систем управления лежат два принципа: ситуационное управление (управление на основе анализа внешних ситуаций или событий) и использование современных информационных технологий обработки знаний.

Интеллектуальные системы управления определяют основу концепции интеллектуальности – либо умение работать с формализованными знаниями человека (экспертные системы, нечеткая логика), либо свойственные человеку приемы обучения и мышления (искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы). Структурно интеллектуальные СУ содержат дополнительные блоки, выполняющие системную обработку знаний на основе названных выше информационных технологий. Данные блоки могут

выполняться либо как надстройка над обычным регулятором, настраивая нужным образом его параметры, либо непосредственно включаться в замкнутый контур управления.

В рамках исследования предлагается практическая концепция создания интеллектуальной системы управления (ИСУ) мелкосерийным производством, на базе существующих на предприятиях автоматизированных систем управления производством с использованием в качестве экспертных знаний лучшие практики оптимизации производственных процессов, методы искусственного интеллекта и систем поддержки принятия личных и коллективных решений с учетом специфики организации мелкосерийных производств. Система разрабатывается на базе взаимно-интегрированных стандартных автоматизированных систем управления, ситуационного центра предприятия, расширяя функционал таких систем *интеллектуальными элементами*, способными в автоматическом режиме решать задачи оптимального управления и влиять на работу производства, путем передачи управляющих воздействий в систему управления. Под интеллектуальными элементами понимаются механизмы, позволяющие в определенных ситуациях частично или полностью заменить собой лицо принимающее решение.

Основными отличительными особенностями создаваемой системы являются симбиоз автоматизации и рационализации производства и развития существующих автоматизированных систем управления путем создания встроенных интеллектуальных элементов, в том числе:

1. Подсистема многокритериальной оптимизации календарного планирования производства с использованием специальных нечётких множеств для построения обобщенного критерия оптимизации.
2. Интеллектуальные элементы синхронизации производства, базирующиеся на адаптированных для произвольного мелкосерийного производства принципах быстро реагирующего производства.
3. Ситуационный центр производственного предприятия, выполняющего функции поддержки принятия коллективных решений и также являющегося экспертной системой решения задач управления с использованием принципов бережливого производства, теории ограничений и сетецентрического производства
4. Открыты внутренние и внешние интерфейсы системы.

На рисунке 4 представлена одна из возможных структурных схем интеллектуальной системы управления производством.

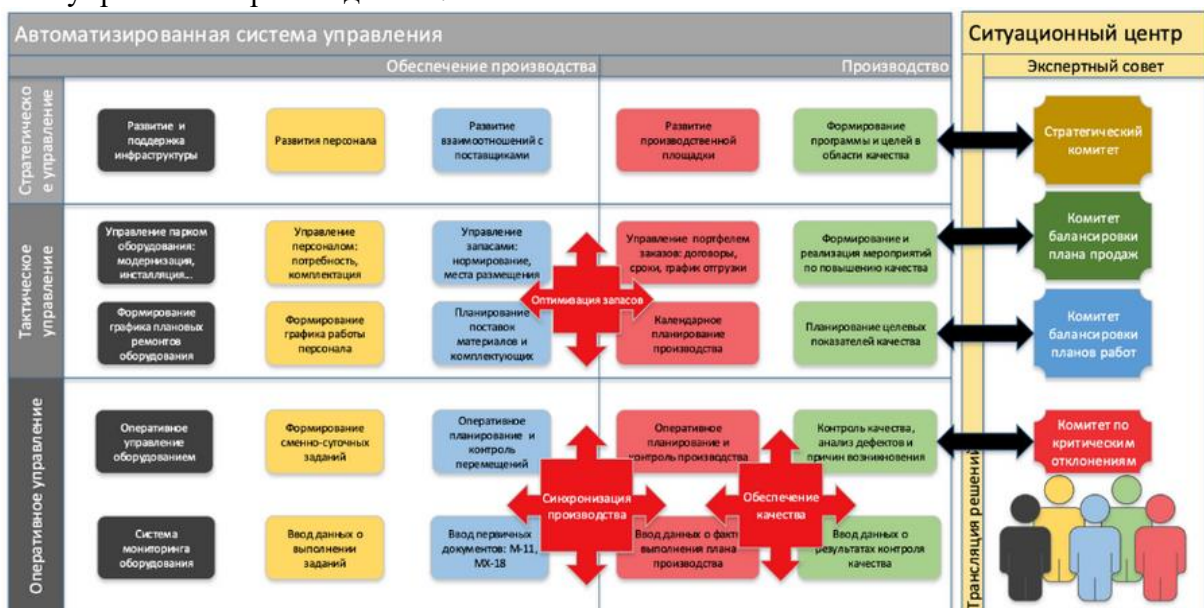


Рисунок 4 – Интеллектуальная система управления производством

Для обеспечения работы интеллектуальной системы управления производством, потребовалась разработка целого ряда адекватных математических моделей, достаточно полно отражающих природу объекта управления. В рамках практического построения

интеллектуальной системы управления необходимо было сформировать перечень используемых математических моделей и обеспечить взаимоувязку моделей между собой и автоматизированной системой управления предприятия, которая будет выступать источником исходных данных для модели, и куда будут направляться результаты моделирования.

В процессе решения реальных задач управления производством, часть информации может быть использована в качестве объективных ограничений, а другая часть может выступать в качестве решения задачи управления. В зависимости от того, как формулируется задача управления, часть факторов могут стать «первичными» (ограничения задачи), а часть факторов «вторичными», т.е. рассчитываемыми в процессе решения задачи, исходя из целей управления и существующих ограничений.

Была предложена математическая модель с открытым интерфейсом (ММОИ) – универсальная математическая модель, для которой определены:

1. перечень информационных массивов системы, часть из которых в дальнейшем будет использоваться для ввода исходных данных, а часть в качестве переменных;
2. система уравнений состояния – перечень равенств, связывающих информационные массивы в единую систему;
3. перечень возможных ограничений системы – система неравенств, ограничивающая область решений;
4. перечень возможных критериев оптимальности – математических выражений, используемых для выбора наилучшего решения задачи;
5. механизм построения комплексного критерия оптимальности – может быть не определён, в таком случае имеет место быть многокритериальная Парето оптимизация;
6. система дополнительных ограничений – математические выражения общего вида, в качестве переменных, в которых могут выступать любые информационные массивы системы;
7. все информационные массивы должны участвовать, по крайней мере, в одном из уравнений или неравенств системы, в противном случае, информационный массив не способен влиять на состояние системы.

Реализация моделей управления с открытым интерфейсом в интеллектуальной системе управления позволяет системе решать в автоматическом или же в автоматизированном режиме самые различные задачи управления в оперативном режиме, что на порядок повышает оперативность принятия управленческих решений, и качество управленческих решений, за счет использования обоснованных математических моделей и методов оптимизации.

Предложенная концепция создания интеллектуальной системы управления предприятия позволяет постепенно развивать существующие на предприятии автоматизированные системы управления с целью добавления интеллектуальных элементов и систему поддержки принятия решений. Такой подход позволяет внедрять интеллектуальные функции постепенно, не требуя от предприятия больших инвестиционных вложений, которые требуются при попытке замены одной информационной системы на другую. Вложения требуются непосредственно на разработку и интеграцию интеллектуальных элементов в существующие информационные системы.

**В третьей главе** рассмотрены математические модели управления производством, призванные оптимизировать деятельность предприятия с использованием математических методов дискретной оптимизации.

### *Планирование*

Выполнена постановка задачи оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала. Пусть процесс производства осуществляется в нескольких цехах, каждый из которых содержит в себе определенное множество рабочих центров (станков или просто рабочих мест). Все рабочие

центры разделены на типы. Типы рабочего оборудования пронумеруем индексом  $k \in \overline{1, E}$ , где  $E$  – общее количество типов оборудования. Введем матрицу  $q$ , отражающую план доступности оборудования, где  $q_{kd}$  – количество единиц оборудования  $k$ -го типа, доступных для выполнения операций в день  $d \in \overline{1, T}$ . Максимальным значением  $q_{kd}$  будет количество станков типа  $k$ , имеющихся на производстве. В случае, если в определенный день запланирован ремонт или профилактика станка  $k$ , значение  $q_{kd}$  уменьшится на 1. Если ремонт будет занимать только полдня, то значение  $q_{kd}$  уменьшится на 0,5 и т.д.

Максимальная загрузка каждой единицы рабочего оборудования ограничена некоторым количеством часов в день. Будем измерять время загрузки оборудования в часах и положим, что максимальная загрузка оборудования  $k$ -го типа одинакова и равна  $t_k^*$  часа.

Должен быть составлен единый перечень всех номенклатурных единиц от материалов до готовых изделий, включая полуфабрикаты. В этом перечне каждой номенклатурной единице присваивается уникальный номер  $i \in \overline{1, C}$ , где  $C$  – суммарное количество уникальных номенклатурных единиц во всех спецификациях.

Для описания состава изготавливаемых номенклатурных единиц введем матрицу применимости  $A$ . Ее элементы  $a_{ij}$  определяют количество номенклатурных единиц (компонентов) с номерами  $i \in \overline{1, C}$ , необходимых для производства номенклатурных единиц с номерами  $j \in \overline{1, N}$ .

Технологические процессы, описывающие способ производства каждой изготавливаемой номенклатурной единицы, считаются заданными.

Главный календарный план производства описывает план, исходя из номенклатурных позиций независимого спроса. В соответствии со сказанным выше, ГКПП задается в виде матрицы  $g$ . Ее элементы  $g_{id}^z$  определяют количество номенклатурных единиц (компонентов), которые необходимо произвести. Введем приоритет заказа  $\sigma_z \in \overline{0, 1}$ .

Считается заданной матрица  $r$ , ее элементы  $r_{id}^z$  – остаток  $i$ -ой номенклатурной единицы на цеховых складах на начало планового периода для  $d = 0$ , под заказ  $z \in \overline{0, Z}$ , либо количество компонентов  $i$ , поставка которых запланирована на день  $d$ .

Введем матрицу  $n_i^z$  – количество запланированных технологических этапов вида  $i \in \overline{1, N}$ . Компоненты вектора  $\bar{n}^z$  могут быть найдены по формуле:

$$\bar{n}_i^z = \sum_{d=1}^T g_{id}^z + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \cdot n_j - r_{i0}^z$$

Соотношение учитывает, что остатки на складах зарезервированы под определенные заказы  $z \in \overline{1, Z}$ .

Для каждого технологического этапа определен набор технологических операций (далее операции), которые должны быть совершены для того, чтобы технологический этап считался завершенным. Таким образом, определен вектор  $\bar{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)$ , где  $w_i$  – количество операций в технологическом этапе.

Введем матрицу  $o_{il}^z$  – количество операций, которые необходимо выполнить в плановом периоде по каждому заказу на  $i$ -ом технологическом этапе,  $l \in \overline{1, w_i}$ ,  $z = \overline{1, Z}$ ,  $i \in \overline{1, N}$ .

Введем матрицу трудоемкости операций  $t_{il}$ , где  $t_{il}$  – трудоемкость операции  $l$ -го вида, выраженная в часах, выполненная на  $i$ -ом технологическом этапе,  $l \in \overline{1, w_i}$ ,  $i \in \overline{1, N}$ .

Введем матрицу  $e_{il}^{\square}$ ,  $l \in \overline{1, w_i}$ , которая определяет, на рабочих центрах какого типа выполняется операция  $l$ -го вида на  $i$ -ом технологическом этапе,  $i \in \overline{1, N}$ .

Для описания незавершенного производства на начало периода, введем матрицу  $f_{il}^z$ ,  $l \in \overline{1, w_i}$ ,  $i \in \overline{1, N}$  которая определяет количество операций  $l$ -го вида для каждого заказа, завершенных на данный момент. Компонент является незавершенным в том случае, если по нему выполнена первая операция, но не выполнена последняя операция технологического процесса.

Набор операций, который необходимо выполнить в плановом периоде по каждому заказу, можно определить следующим образом:

$$o_{il}^z = \begin{cases} n_i^z - f_{il}^z, n_i^z - f_{il}^z > 0 \\ 0, n_i^z - f_{il}^z \leq 0 \end{cases}, \text{ где } l \in \overline{1, w_l}, i \in \overline{1, N}$$

Количество операций  $l$ -го вида по  $i$ -ой номенклатурной позиции по  $z$ -му заказу будет равно количеству, компонентов, которые необходимо произвести в плановом периоде за вычетом количества операций, уже выполненных в прошлом периоде (незавершенное производство).

Для описания плана производства введем матрицу  $P (p_{il}^z)$ .

Введем матрицу баланса номенклатурных единиц  $B (b_{id})$ :

$$b_{id} = \begin{cases} \sum_Z r_{id}^z, i \in \overline{1, C}, d = 0 \\ b_{id-1} + \sum_Z p_{i, w_{i-1}, d}^z + \sum_Z r_{id}^z - \sum_Z \alpha^z \cdot g_{id}^z - \sum_Z \sum_{j=1}^N p_{j, 1, d}^z a_{ij}, i \in \overline{1, N}, d \in \overline{1, T}, \\ b_{id-1} + \sum_Z r_{id}^z - \sum_Z \sum_{j=1}^N p_{j, 1, d}^z a_{ij}, N < i \leq C, d \in \overline{1, T} \end{cases}$$

При составлении календарного плана производства должны учитываться следующие ограничения:

Суммарное количество операций одного вида по заказам, в календарном плане должно быть равно общему количеству операций данного вида:

$$\sum_{d=1}^T p_{il}^z = o_{il}^z \alpha_z, \text{ где } \alpha = |\alpha_1, \dots, \alpha_z|; \alpha_z = \begin{cases} 0, \text{ не входит} \\ 1, \text{ входит} \end{cases}, z \in \overline{1, Z}$$

В каждый из планируемых дней, максимальная загрузка рабочих центров не должна превышать максимально возможную загрузку рабочих центров в этот день:

$$\sum_{i=1}^N \sum_Z \sum_{l=1}^{w_i} p_{il}^z t_{il}^z \beta_{lk}^z \leq t_k^* q_{kd}, \text{ где } d \in \overline{1, T}, \beta_{lk}^z = \begin{cases} 1, e_{il}^z = k \\ 0, e_{il}^z \neq k \end{cases}, l \in \overline{1, w_l}, k \in \overline{1, E}, z \in \overline{1, Z}$$

В любой момент времени остаток номенклатурных единиц не может быть отрицательным:

$$b_{id} \geq 0, \text{ где } i \in \overline{1, C}, d \in \overline{0, T}$$

Производство любого заказа должно выполняться по строго заданному технологическому маршруту:

$$\forall d^*: \sum_{d=1}^{d^*} P_{id}^z + f_{il}^z \geq \sum_{d=1}^{d^*} P_{id+1}^z + f_{il+1}^z, i \in \overline{1, N}, d \in \overline{1, d^*}, l \in \overline{1, w_l}, z \in \overline{1, Z}$$

**Критерии оптимальности календарного плана производства**

Введем четыре основных критерия оптимальности календарного плана производства:

Критерий комфортности производства, т.е. календарный план производства должен быть скомпонован таким образом, что операции одного вида запускаются в производство как можно большими партиями:

$$J_1 = \sum_Z \sum_{l=1}^{w_l} \sum_{d=1}^T \beta_{ld}^z \rightarrow \min, \text{ где } \beta_{ld}^z = \begin{cases} 1, p_{ld}^z \neq 0 \\ 0, p_{ld}^z = 0 \end{cases}, z \in \overline{1, Z}$$

Производство должно быть равномерным:

$$J_2 = \sum_{d=1}^{T-1} \sum_{k=1}^E |\theta_{kd} - \theta_{kd+1}| \rightarrow \min, \text{ где } \theta_{kd} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_Z \sum_{l=1}^{w_l} p_{il}^z t_{il}^z \beta_{lk}^z}{t_k q_{kd}}, \beta_{lk}^z = \begin{cases} 1, e_{il}^z = k \\ 0, e_{il}^z \neq k \end{cases}, z \in \overline{1, Z}$$

Срок изготовления ГКПП должен быть минимальным:

$$J_3 = \max_{d \in \overline{1, T}} \omega(d) \rightarrow \min, \quad \text{где}$$

$$\omega(d) = \begin{cases} d, \sum_Z \sum_{l=1}^{w_l} \sum_{u=d}^T p_{lu}^z \neq 0 \\ 0, \sum_Z \sum_{l=1}^{w_l} \sum_{u=d}^T p_{lu}^z = 0 \end{cases}, z \in \overline{1, Z}$$

Производство должно выполнять максимальное количество приоритетных заказов:

$$J_4 = \sum_{z=1}^Z \sigma_z \alpha_z \rightarrow \max, \text{ где } \alpha = |\alpha_1, \dots, \alpha_z|; \alpha_z = \begin{cases} 0, \text{ не входит} \\ 1, \text{ входит} \end{cases}, \sigma_z = \overline{0, 1};$$

$z \in \overline{1, Z}$  – номер заказа в портфель,  $\sigma_z$  – приоритет заказа в портфеле.



На основе предложенных частных критериев может быть введен обобщенный критерий оптимальности с использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности  $J^r = \{\mu_1/J_1; \mu_2/J_2; \mu_3/J_3\}$ , где  $\mu_i \in [0; 1], i \in \overline{1,4}$  – экспертная оценка значимости  $i$ -го критерия. Теперь, используя четкую функцию от нечеткого аргумента  $H(J^{r1}, J^{r2})$  (специальный индекс ранжирования), можно записать:

$$H(J^{r1}, J^{r2}) = \text{sign}(C_i), \text{ где } C_i = \frac{\mu_i^{\square} \times J_i^{r1} - \mu_i^{\square} \times J_i^{r2}}{d_i},$$

$$i \text{ доставляет } \max \left| \frac{\mu_i^{\square} \times J_i^{r1} - \mu_i^{\square} \times J_i^{r2}}{d_i} \right|$$

$\mu_i$ - функция принадлежности (значимость)  $J_i^{r1}$  (или  $J_i^{r2}$ ),

$$d_i = \max (J_i^{r1}; J_i^{r2})$$

Для решения задачи с использованием индекса ранжирования могут быть использованы различные численные методы дискретной оптимизации. Однако на практике более удобным бывает переход от задачи оптимизации к задаче выбора на заданном множестве возможных альтернатив. В рассмотренном случае количество допустимых производственных планов, удовлетворяющих ограничениям, бывает невелико, что позволяет осуществить такой переход и проводить выбор наилучшего плана напрямую с помощью индекса.

### Синхронизация

Также в диссертации рассмотрена задача синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства.

В качестве объекта исследования рассматривается мелкосерийное дискретное универсальное производство с широким спектром высоко-номенклатурной разнообразной продукции.

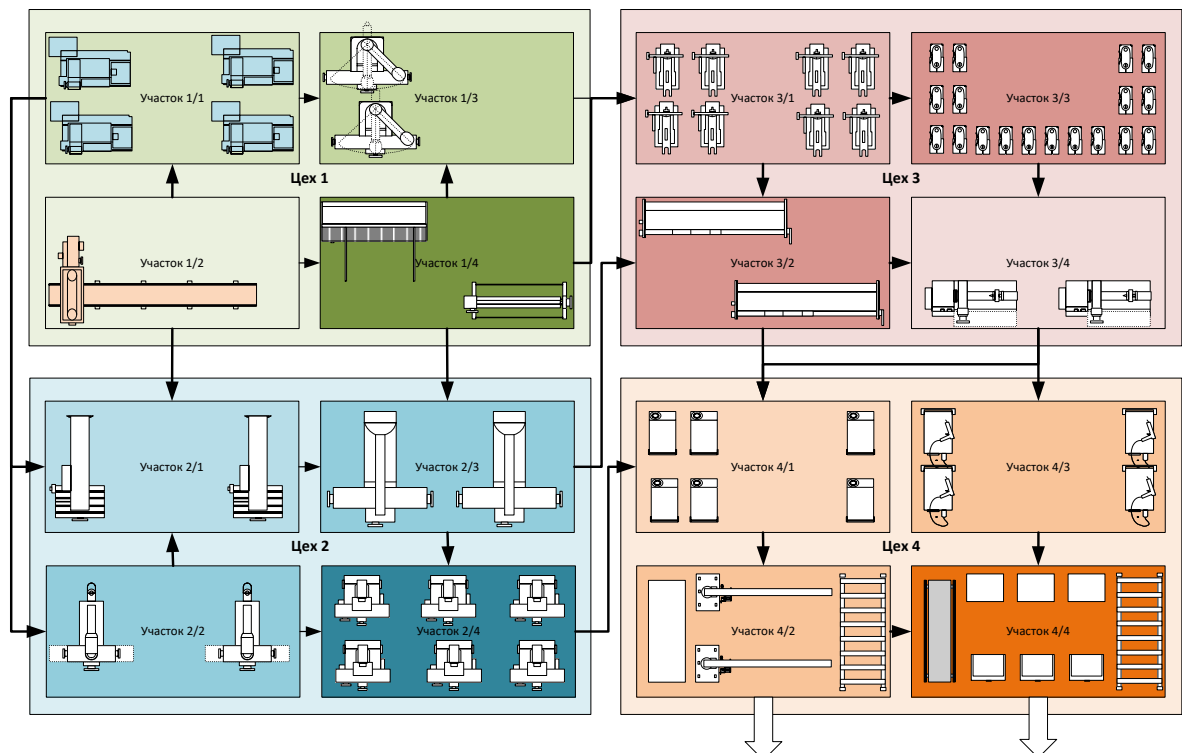


Рисунок 5 – Пример организации производства и деления на участки

Считается, что на предприятии внедрена автоматизированная система управления предприятием, построенная на стандартной для MRP II модели данных:

1. Заданы ресурсные спецификации на изделия и полуфабрикаты.
2. Заданы технологические маршруты изготовления.
3. Введены календарные нормативы длительности маршрутных переходов.
4. Сформирован Главный Календарный План Производства.



Вводится понятие *карточки синхронизации*, предназначенной для синхронизации деятельности участков с целью минимизации производства невостребованной продукции, излишних запасов. Количество доступных для использования карточек синхронизации определим в массиве  $K_{k_1 k_2}$ , где  $k_1$  – участок получатель, а  $k_2$  – участок поставщик.

Количество используемых поставщиком  $k_2$  карточек участка  $k_1$  определяется путем подсчета количества партий деталей, находящихся в цехе  $k_1$ , предыдущим участком обработки которых является  $k_2$ . При этом в каждый момент времени, количество карточек, используемых в данный момент  $K_{k_1 k_2}^*$  не должно превышать количество доступных карточек синхронизации:

$$K_{k_1 k_2}^* = \sum_{p=1}^p q(p, k_1 k_2) \leq K_{k_1 k_2}, \text{ где } q(p, k_1 k_2) = \begin{cases} 1, M_{C_p p} = k_2 \wedge M_{C_{p+1} p} = k_1 \wedge S_p \in [2,3] \\ 0, M_{C_p p} \neq k_2 \vee M_{C_{p+1} p} \neq k_1 \vee S_p \in [0,1,4] \end{cases}$$

Требуется определить и перевести к выполнению такие партии  $p^* \in \overline{FA}$ , для которых выполняются следующие условия:

$$p^* \in \vec{F} = \{p \mid t \geq DP_{C_p p} \wedge S_p = 1\}$$

$$\sum_{p^* \in \overline{FA}} \omega(p^*, k_1, k_2) + K_{k_1 k_2}^* \leq K_{k_1 k_2},$$

$$\text{где } \omega(p, k_1, k_2) = \begin{cases} 1, M_{C_p p} = k_2 \wedge M_{C_{p+1} p} = k_1 \wedge C_p > 1 \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$$

$$J_1 = \sum_{p^* \in \overline{FA}} W_{p^*} \rightarrow \max$$

$$J_2 = \sum_{p^* \in \overline{FA}} DP_{C_p p^*} \rightarrow \min$$

Приведенная выше постановка задачи является двухкритериальной задачей оптимизации с двумя независимыми критериями. Для решения данной задачи могут быть использован обобщенный критерий оптимальности с использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности описанный в задаче оптимального календарного планирования.

### MES

**Задача оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов**

Решением задачи формирования сменно-суточного задания цеха будет заполнение массива кортежей данных  $T_s$  следующего вида

$$T_s = (d_s, o_s, ot_s, w_s, m_s, tr_s)$$

, где  $o_s \in o_{ij}$  – назначаемая операция,

$ot_s \leq oc_{ij}$  – количество полуфабрикатов к обработке в рамках задания,

$w_s \in W_k^{ij}$  – назначенный исполнитель операции,

$m_s \in M_c^{ij}$  – назначенное оборудование операции,

$tr_s = tr_{ij} \times \frac{ot_s}{oc_{ij}}$  – трудоемкость выданных работ.

При этом, на сменное задание наложен ряд естественных ограничений:

Количество выдаваемых операций не должно превышать количество операций в плане:

$$\sum_{o_s = o_{ij}} ot_s \leq oc_{ij}$$

Трудоемкость назначаемых исполнителю работ не должно превышать максимально-допустимое значение:

$$\sum_{w_s = W_k} tr_s \leq Dl_k$$

Трудоемкость назначаемых на оборудование работ не должно превышать максимально-допустимое значение:

$$\sum_{m_s=M_c} tr_s \leq D_l$$

Порядок выполнения операций не должен нарушаться:

$$\sum_{o_s=o_{ij}} ot_s + PC_i - o_{ij} \leq \sum_{o_s=o_{ij+1}} ot_s + PC_i - o_{ij+1}$$

Статистика выполнения сменных заданий накапливается в фактических массивах кортежей данных  $F_a$  следующего вида

$$F_a = (d_a, o_a, ot_a, w_a, m_a, tr_a, of_a, ob_a, trf_a)$$

где к ранее описанным переменным добавляются следующие:

$of_a \leq oc_{ij}$  – количество фактически обработанных полуфабрикатов

$ob_a \leq oc_{ij}$  – количество полуфабрикатов обработанных с отклонениями

$trf_a \leq oc_{ij}$  – фактически достигнутая трудоемкость

На основании статистики может быть построена функция специализации операций за оборудованием и исполнителями, которая оценивает данные за период учета статистики  $D$ . Значение специализации выше, если ближайшее время были успешно выполненные операции указанного вида указанным исполнителем на указанном оборудовании. Значение функции уменьшается, если есть статистика по выполнению операций с отклонениями:

$$Sp(o_{ij}, W_k, M_c) = \sum_{\substack{o_{ij}, W_k, M_c \\ ot_a=of_a \\ tr_a=trf_a \\ d_a \in \overline{-D, 0}}} sign(ot_a) \times \left(1 + \frac{d_a}{D}\right) - \sum_{\substack{o_{ij}, W_k, M_c \\ ot_a \neq of_a \\ tr_a \neq trf_a \\ d_a \in \overline{-D, 0}}} sign(ot_a) \times \left(1 + \frac{d_a}{D}\right)$$

### Критерии оптимизации

Рассмотрим частные критерии оптимальности сменного задания:

Срочность назначаемых работ должна быть максимальна:

$$J_1 = \sum U(T_s) \rightarrow \min \quad \square$$

Риск невыполнения операций по причине невыполнения предшествующих операций должен быть минимален:

$$J_2 = \sum j(T_s) \rightarrow \min \quad \square$$

Уровень специализации назначаемых операций за исполнителем и оборудованием должен быть максимальным (критерий приведен к минимизации):

$$J_3 = -\sum Sp(T_s) \rightarrow \min \quad \square$$

Для решения данной задачи также может быть использован обобщенный критерий оптимальности с использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности описанный в задаче оптимального календарного планирования.

### СППР

Рассматривается задача выбора наилучшего решения из заданного множества альтернатив, возникающая при некоторой сложившейся ситуации и требующая быстрого решения с учетом системного анализа ситуации и возможных последствий принятия управленческого решения. Решение принимается небольшой группой экспертов, которые и представляют собой коллективное лицо, принимающее решение.

Требуется предложить наилучшую организацию работы ЛПР и возможные модели принятия коллективного решения, позволяющие учитывать различные предпочтения и квалификацию экспертов, а также неоднозначность выбора при наличии нескольких показателей качества получаемого решения.

**Математическая постановка задачи.** Пусть  $X$  – конечное множество альтернатив  $x_j \in X, j = 1, \dots, n$ . Под альтернативой будем понимать допустимый вариант решения ситуационной

задачи с набором числовых значений частных показателей качества данного решения. Требуется найти коллективное решение ситуационной задачи, под которым понимается некое групповое предпочтение на множестве  $X$ , полученное на основе обработки частных предпочтений всех участников ГЛПР.

Теперь для  $i$ -й альтернативы введем функцию *предпочтительности*  $pr(x_i)$  следующим образом:

$$pr(x_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_j^i \left( \sum_{k=1}^r \beta_k^j v_k J_k^i \right), \quad i = 1, \dots, n.$$

Если считать, что квалификация эксперта не связана с экономическим смыслом частных показателей качества альтернативы, то выбор наилучшей альтернативы не будет зависеть от квалификации экспертов и функция *предпочтительности* может быть переписана в виде

$$pr(x_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_j^i \left( \sum_{k=1}^r v_k \cdot J_k^i \right), \quad i = 1, \dots, n.$$

В качестве наилучшей альтернативы  $x_i$  выбирается та альтернатива  $x_l$ , для которой выполняется условие

$$pr(x_i) > pr(x_l), \quad \forall i, l = 1, \dots, n, \quad i \neq l.$$

Другими словами, лучшей считается та альтернатива, для которой функция *предпочтительности* принимает максимальное значение.

К недостаткам предложенной линейной модели можно отнести использование гипотезы линейности при вычислении функции предпочтительности.

#### 4

**Четвертая глава** посвящена применению методов математического и имитационного моделирования при решении интеллектуальных задач управления. Описывается математическая модель календарного планирования и решение тестовых задач.

#### *Календарное планирование*

В качестве тестового примера был взят реальный ГКПП предприятия. Основным критерием для данной задачи был критерий скорости выполнения плана производства. С помощью системы планирования был найден план-график производства, позволяющий произвести необходимое количество продукции за 17 дней вместо 22, которые понадобились для того, чтобы произвести продукцию в реальных условиях производства без использования системы планирования.

Найденный допустимый план был оптимизирован с помощью алгоритма оптимизации плана производства в несколько этапов:

1. Критерий комфортности производства был выбран в качестве основного.

2. Задан комплексный критерий оптимизации.

3. Найденны решения для всех значений функции принадлежности от 0,1 до 1 с шагом в 0,1. Из полученного множества решений были исключены заведомо не оптимальные, оставшиеся приведены в табл. 3. Затем с помощью индекса ранжирования были получены «наилучшие» значения функций принадлежности:  $\mu_1 = 1$ ,  $\mu_2 = 0,6$ ,  $\mu_3 = 0,8$ .

Таблица 2. ГКПП

Дата выпуска	Число изделий
22	50
44	50
66	50

Таблица 3. Множество выбираемых решений задачи

№	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	Ранг
---	---------	---------	---------	-------	-------	-------	------

На рисунке 6 представлен график изменения показателя равномерности плана производства  $\rho_d$  для четырех планов: допустимый план до оптимизации (далее допустимый), план после оптимизации по критерию комфортности (далее комфортный), план после оптимизации по комплексному критерию с экспертными оценками (далее экспертный) и план после оптимизации по комплексному критерию с наилучшими оценками важности критериев (далее оптимальный).

1	0,4	1	0,3	0,405	0,975	0,365	
2	0,7	1	0,3	0,745	0,849	0,376	
3	1	0,8	0,4	0,827	0,75	0,4	
4	0,4	0,7	1	0,423	0,592	0,967	
5	0,5	0,4	1	0,534	0,479	1	
6	0,5	1	0,7	0,497	0,897	0,624	
7	0,5	1	0,8	0,397	0,854	0,793	3
8	1	0,3	1	0,871	0,275	0,972	5
9	1	0,4	0,5	0,935	0,437	0,761	
10	1	0,6	0,8	0,832	0,503	0,807	1
11	0,9	0,6	0,8	0,81	0,513	0,838	2
12	1	0,4	0,9	0,891	0,315	0,956	4
13	0,9	0,3	1	0,83	0,365	0,985	

На рисунке 6 представлены значения показателя минимальности риска срыва производства  $\phi$  для допустимого, комфортного, экспертного и оптимального производственных планов. На рисунках 7 и 8 представлены значения показателя комфортности  $K$  для допустимого, комфортного и оптимального производственных планов.



Рисунок 6 – Равномерность загрузки

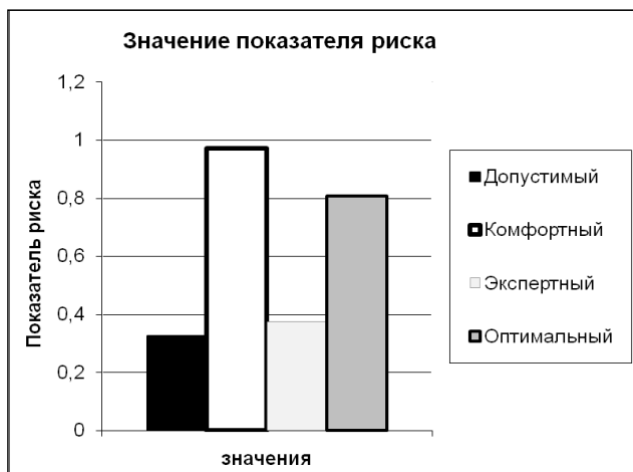


Рисунок 7 – Риск срыва производства

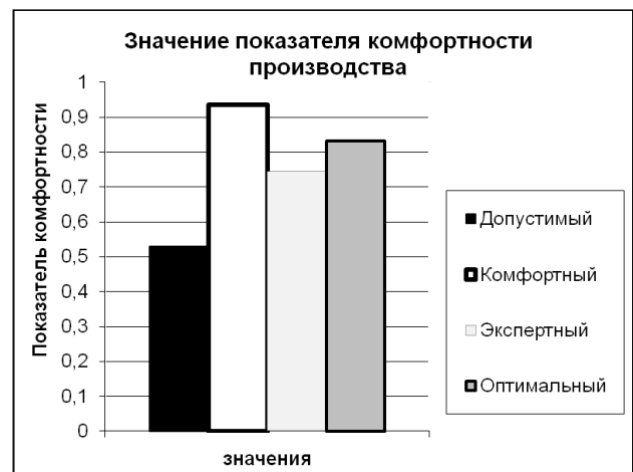


Рисунок 8 – Комфортность производства

По результатам тестовых испытаний системы автоматического планирования производства можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная система, способна находить календарные планы, удовлетворяющие всем ограничениям задачи.
2. Встроенные средства оптимизации позволяют находить календарные планы с учетом всех критериев оптимальности календарного плана.
3. Дополнительные функции позволяют балансировать важность критериев.

### Синхронизированное производство

Пусть производство состоит из шести производственных участков. На данный момент необходимо выполнить два заказа с одинаковым приоритетом на два типа изделий («ДСЕ1» и «ДСЕ2») по 200 единиц каждого типа.

Оба заказа должны быть отгружены через шесть недель, а за срыв срока отгрузки предусмотрены пени, в размере 3% стоимости контракта за каждую неделю задержки. Плановая прибыльность заказов составляет 20% от стоимости изделий.

Пусть «ДСЕ1» обрабатывается на участках 1, 3, 4, 6, а «ДСЕ2» – на участках 2, 3, 5, 6.

Оборудование на участках 4 и 5 сильно изношено, что постоянно приводит к остановкам производства (случайные по времени) на данных участках. Известно, что время ремонта оборудования составляет в среднем неделю. Общая доступность оборудования составляет 60% времени. Это означает, что на длительном промежутке времени, участки работают в среднем 60% времени, остальное время оборудование находится в ремонте, но время поломки оборудования и срок ремонта заранее неизвестны и являются случайными величинами.

Для демонстрации работы алгоритма было необходимо дважды повторить численный эксперимент в равных условиях, для этого были зафиксированы следующие периоды простоя, полученные с помощью генератора случайных чисел:

Таблица 4. Простои оборудования

Участок / количество дней простоя	Неделя								Дней	%
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Участок №4	3		3	1	5	4			17	43%
Участок №5		2	3		5		2	4	16	40%

Для начала рассмотрим стандартную работу производства с заранее известным планом производства (рисунок 9).

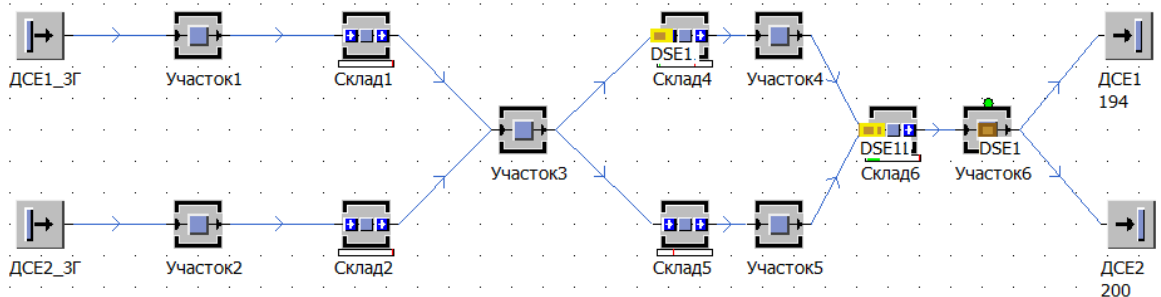


Рисунок 9 – Классическое производство в последний рабочий день восьмой недели

Теперь рассмотрим, как в этой же ситуации работала бы синхронизированная система управления производством.

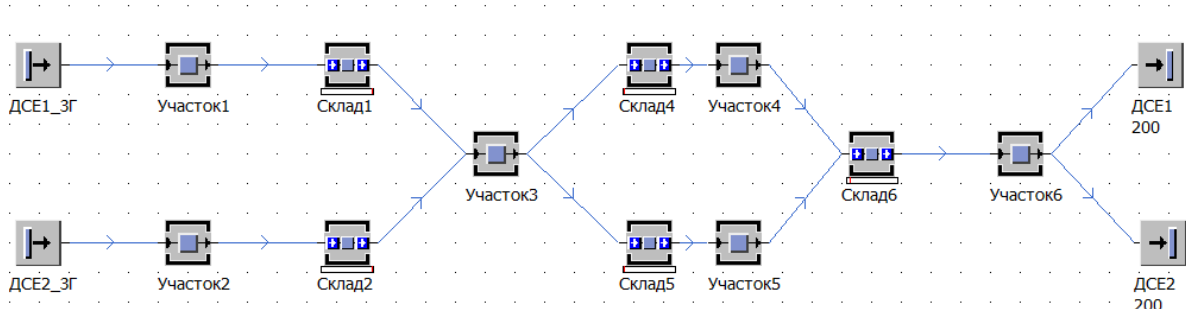


Рисунок 10 – Синхронизированное производство в третий день восьмой недели

Производство завершилось значительно раньше, чем без использования синхронизированной системы.

Сведем результаты моделирования в таблице 5.

Таблица 5. Результаты моделирования

	Классическое производство		Синхронизированное производство	
	ДСЕ 1	ДСЕ2	ДСЕ1	ДСЕ2
Время завершения заказа	40 день (8 недель)	36 день (7 недель)	38 день (8 недель)	31 день (6 недель)
Цикл производства 1 шт.	8 дней	4 дня	1 день	1 день
Уровень незавершенного производства	~36 изделий	~36 изделий	~5 изделий	~5 изделий
Время производства	9%	16%	60%	62%
Хранение на складе	91%	84%	40%	38%
Начисленные пени	6%	3%	6%	0%
Рентабельность продаж	16%		17%	

### MES

Продемонстрировано решение тестовых задач оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов.

#### *Алгоритм решения задачи формирования сменных заданий*

Задача формирования оптимальных сменных заданий является нелинейной задачей с нечетким критерием оптимизации, что делает невозможным ее решение аналитическими методами. Следовательно, необходимо разработать достаточно эффективный эмпирический алгоритм решения задачи, чтобы его программная реализация позволяла находить близкие к оптимальным решения задачи за приемлемое время.

Рассмотрим один из возможных алгоритмов решения задачи. Данный алгоритм состоит из следующих последовательных шагов:

1. Выбор стратегии формирования сменного задания на основе анализа общего перечня операций к выполнению.
2. Формирование и планирование Парето-множества операций с высокими показателями по все частным критериям оптимизации.
3. Деление общего массива операций на три множества с преобладанием первого критерия, второго или третьего.
4. Последовательное планирование операций из трех множеств пропорционально весовым коэффициентам функции принадлежности.

Исходя из рассчитанных значений, определяется стратегия формирования сменных заданий:

1. «Оптимальное распределение».
2. «Распределение по оборудованию».
3. «Распределение по исполнителям».
4. «Первые или срочные».
5. «Высокий уровень незавершенного производства».

Для каждого этапа производства (перечня операций, выполняемых в одном цехе) рассчитывается срочность выполнения работ.

Решение задачи состоит в формировании сменных заданий для всех исполнителей и оборудования исходя из рассчитанной срочности выполнения работ, последовательно от самых срочных до минимальных значений. При этом контролируются лимиты времени работы исполнителей и оборудования.

Для тестирования работы алгоритмов автоматического формирования сменных заданий автоматически сформированные задания передавались на корректировку экспертам от производства, также отдельно сравнивались подготовленные экспертами сменные задания с автоматически рассчитанными. Без накопленной статистики количество ручных корректировок и отмен операций составлял ~20%, что является достаточно большим процентом неточности планирования.

### **Принятие решений**

Математические модели интеллектуального анализа хода производства и принятия коллективных решений на базе единой информационной системы промышленного предприятия.

Рассмотрим пример применения предложенных моделей при выборе наилучшего варианта операционного плана производства при заданном главном календарном плане производства (ГКПП).

Считается, что качество составления операционного плана производства оценивается по трем базовым показателям:

1. *Комфортность производства.*
2. *Равномерность производства.*
3. *Минимальность срока изготовления.*

Пусть в результате расчета найдено три допустимых варианта операционного плана производства (три альтернативы), эффективность каждого из которых может характеризоваться различными значениями заданных показателей качества (таблица 6).

Таблица 6. Варианты планов производства

Наименование альтернативы	Достигнутые значения показателей		
	Комфортность	Равномерность	Срок изготовления
Точно вовремя ( $x_1$ )	0,62	0,44	0,89
Максимальные партии ( $x_2$ )	0,76	0,53	0,56
Ритмичность ( $x_3$ )	0,55	0,87	0,61

Для принятия коллективного решения сформирован комитет, который состоит из ГЛПР, включающего 10 экспертов из различных подразделений предприятия, которые оценивают данные варианты путем их сравнения, а также ОЛПР, возглавляющего этот комитет.

Для выбора наилучшего коллективного решения с учетом важности частных показателей качества альтернативы применим линейную и нелинейную многокритериальные модели, рассмотренные выше.

Пусть для частных показателей качества альтернативы заданы оценки важности, установленные ОЛПР (таблица 7).

Таблица 7. Важности показателей качества альтернатив

№ п/п	Показатели	Важность $v_k$
1	Комфортность	0,5
2	Равномерность	0,4
3	Срок изготовления	1,0

Результаты попарного сравнения частных показателей качества  $J_k^i$  с учетом их важности  $v_k$  приведены в таблица 8.

Таблица 8. Результаты попарного сравнения альтернатив

№ п/	Пары альтернатив		$C_1$	$C_2$	$C_3$	Результат сравнения
	$J^{r1}$	$J^{r2}$				
1	$x_1$	$x_2$	-0,092	-0,06	0,370	$x_1 > x_2$
2	$x_2$	$x_3$	0,138	-0,15	-0,081	$x_3 > x_2$
3	$x_3$	$x_1$	-0,056	0,200	-0,314	$x_1 > x_3$

В диссертации также приведен общий алгоритм оценки и выбора лучшего варианта решения ситуационной задачи на основе моделей принятия коллективных решений, в котором отражены основные этапы работы ГЛПР и ОЛПР в рамках ситуационного центра.

Следует отметить, что для эффективного применения предлагаемого алгоритма в рамках СЦПП необходимо иметь на предприятии внедренную современную ERP-систему, дополненную интеллектуальными элементами для обработки текущей информации и представления ее в виде возможных решений для рассмотрения ОЛПР.

**Пятая глава** посвящена практической реализации автоматизированной интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства. Отмечено, что на сегодняшний день рынок автоматизированных систем управления предприятиями является высоко конкурентным рынком, на котором представлены как международные корпорации (SAP, Microsoft, Oracle), так и Российские компании 1С, Галактика и т.д. Все производители современных ERP-систем вкладывают средства в постоянное развитие своих решений. Логические архитектуры решений являются крайне продуманными, все данные в системе структурированы, построены сложные системы взаимосвязей. В разработку и внедрение существующих на рынке систем вложены колоссальные средства, ввиду чего, задача разработки новой системы управления производством класса ERP представляется нецелесообразной и нереализуемой. При этом большинство существующих на рынке систем позволяют расширять свой функционал, используя открытые интерфейсы обмена данными, позволяя внедрять в себя дополнительные модули и т.д.

Наиболее интересным представляется подход к созданию интеллектуальной системы управления на базе существующей на предприятии ERP-системы путем встраивания в ERP интеллектуальных элементов или же тесная интеграция в ERP интеллектуальных модулей (подсистем).

Для практической реализации интеллектуальной системы управления предприятием может быть выбрана любая развивающаяся система, широко представленная на рынке. Но следует обратить особое внимание на степень открытости системы для самостоятельного развития и выбранному производителем направлению развития платформы. Крайне важно, чтобы решение развивалось в соответствии с общими тенденциями развития:

1. Развитие модульности решений, позволяющее предприятиям самим выбирать тот функционал, который им необходим, и собирать те конфигурации ERP-решения, которые соответствуют потребностям предприятия.
2. Переход к микросервисной архитектуре программного обеспечения, направленный на взаимодействие, насколько это возможно, небольших, слабо связанных и легко изменяемых модулей.
3. Поддержка мобильных клиентов.
4. Расширение функциональности решений без снятия с поддержки.
5. Развитие средств онлайн-интеграции с другими системами и интернетом вещей.
6. Развитие направлений B2B, B2C и юридически-значимого документооборота.



В качестве базовой информационной системы для создания интеллектуальной системы управления рассмотрена одна из наиболее популярных в России ERP-систем Российской разработки – 1С: ERP УПРАВЛЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЕМ 2 (Далее 1С: ERP).

Существует три основных подхода к созданию интеллектуальных элементов ERP-системы:

1. Доработка типовой конфигурации ERP-системы.
2. Создание расширения функциональности ERP-системы.
3. Создание внешнего сервиса и компонентов двусторонней интеграции с ERP-системой.

Рассмотрим реализацию интеллектуальной системы управления производством на базе технологической платформы «1С Предприятие». Для практической реализации потребовались как разработка математического аппарата, так, собственно, и программная реализация синхронизированной системы управления производством вкпе с компонентами интеграции.

На рисунке 11 представлена схема автоматизации Системы. Данная схема содержит минимальное количество связей, а, следовательно, минимизирует сложность задачи интеграции информационных систем. Данные, необходимые для работы Системы, получаются из ERP-системы в режиме онлайн. Далее осуществляется решение задачи оптимизации.

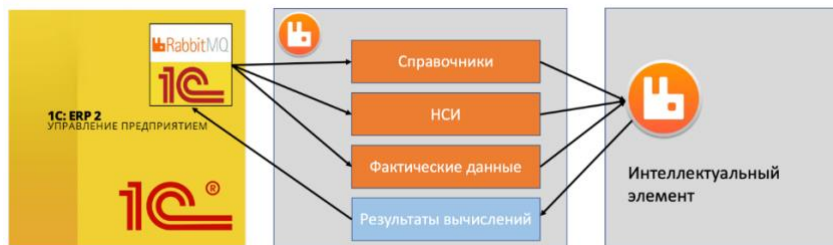


Рисунок 11 – Схема автоматизации Системы

Для стабильной работы системы потребовалось построение надежной системы интеграции, позволяющей в режиме реального времени обмениваться сообщениями обо всех изменениях, происходящих в производственной системе. Для реализации был выбран один из самых интересных на сегодняшний день вариантов реализации механизмов интеграции в мультиплатформенных средах с использованием распределенных систем управления очередями сообщений RabbitMQ.

Интеллектуальные элементы системы разрабатываются как отдельные сервисы, организованные на принципах микросервисной архитектуры, являющейся вариантом сервис-ориентированной архитектуры программного обеспечения, направленной на взаимодействие насколько это возможно небольших, слабо связанных и легко изменяемых модулей – микросервисов.

За счёт повышения гранулярности модулей архитектура нацелена на уменьшение степени зацепления и увеличение связности, что позволяет проще добавлять и изменять функции в системе в любое время.

Итоговая спецификация разработанной интеллектуальной системы управления предприятием, следующая:

1. Базовая технологическая платформа: «1С Предприятие 8»
2. Базовое ERP-решение: «1С ERP Управление предприятием 2»
3. СУБД: Postgres SQL
4. Брокер-сообщений: RabbitMQ
5. Интеграционный адаптер 1С: собственная разработка на базе утилиты PinkRabbit для 1С.
6. Формат сообщений при обменах: JSON.
7. Архитектура решения: микросервисная архитектура с выделением крупных функциональных блоков в отдельные сервисы.
8. Язык написания сервисов: C#

9. Технология исполнения приложений: Docker

10. Система оркестрации микросервисов: Kubernetes.

Получившееся в результате решение соответствует высоким требованиям, предъявляемым предприятиями к корпоративным информационным системам в части масштабируемости, отказоустойчивости и возможности адаптировать и развивать решения в ходе эксплуатации.

**Шестая глава** посвящена апробации разработанной автоматизированной интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях реального производства. На рисунке 12 представлена схема автоматизации Системы. Данная схема содержит минимальное количество связей, а, следовательно, минимизирует сложность задачи интеграции информационных систем. Данные, необходимые для работы Системы, получаются из ERP-системы в режиме онлайн. Далее осуществляется решение задачи оптимизации. Информация о партиях деталей, которые сейчас доступны к обработке, выводится на информационные панели участков и также передается в ERP. Начальник участка (мастер) может брать в работу только те партии, которые Система сделала активными.



Рисунок 12 – Схема автоматизации Системы

Практическая реализация синхронизированной системы управления мелкосерийным производством позволяет значительно повысить эффективность производства, радикально снизить уровень незавершенного производства, цикл производства продукции, затраты на производство. Дополнительно это приводит к значительному повышению прозрачности производства, качества планирования, актуальности данных в системе и повышению организационной управляемости производства. При этом, внедрении синхронизированной системы управления не требует слишком много ресурсов от предприятия, где уже внедрена ERP-система.

Были апробированы механизмы развития встроенного MES для интеллектуального управления внутри цеха. Для практической реализации решения была выбрана технология встраивания решения в 1С:ERP с использованием расширений технологической платформы 1С Предприятие.

Для реализации задачи функционал типового решения был доработан таким образом, чтобы при сохранении существующего функционала система позволяла формировать сменные задания автоматически в соответствии с алгоритмом решения задачи оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов. В системе фиксируется запуск всех партий

деталесборочных единиц. Каждая партия получает свой уникальный идентификатор (номер) и сопроводительный документ со штрих-кодом (рисунок 13).

Лист сопровождения партии ДСЕ № 1100-30661.4.1		от 05.10.2018 20:14:44						
45	ДСЕ	кол-во						
230-1600-320 Корпус	230-1600-320 Корпус	1						
Индивидуальный №		Плавка №						
№	Комплекующие(Материалы)	ЕИ	Норма на шт.	Всего				
1	1855А-18х1,5-30 Заглушка	шт	1	1				
2	230-1600-312-05 Втулка	шт	4	4				
3	230-1600-321 Корпус	шт	1	1				
4	3251А-6-26 Шпилька	шт	2	2				
5	7967.0609 Винт установочный	шт	8	8				
6	Н08-215-6-14 Штифт	шт	4	4				
7	Н08-464-14-30 Заглушка резьбовая	шт	1	1				
№	Цех	Этап производства	Принято	Изготовлено	Отделено	Дата	Сотрудник ПДБ	
			Годных	Брак	к-во	№ ЛСП	Фамилия	Подпись
Отделено от ЛСП: 1100-30661.1.1		Этап отделения 1		0010-0450/045 Мехобработка, сборка, комплектование				
1	45	0010-0450/045 Мехобработка, сборка, комплектование, 1100-30661.4.1	1	1			16.10	

Детали (сб. ед.) соответствуют КД

Особые отметки \_\_\_\_\_

Мастер \_\_\_\_\_ Контролер \_\_\_\_\_

Рисунок 13 – Пример листа сопровождения партии

Для каждого этапа производства (перечня операций, выполняемых в одном цехе) рассчитывается срочность выполнения работ. Задача выполняется в фоновом режиме для всех этапов производства, по которым происходят изменения. Значение обновляется не реже одного раза в день. На рисунке 14 представлен доработанный интерфейс работы информационной системы.

Кнопка «назначить по умолчанию» позволяет выбрать конкретного исполнителя для операции и уточнить рабочий центр (единицу оборудования), на котором будет выполняться операция. При этом, система автоматически рассчитывает загрузку оборудования и рабочих по сменному заданию. В случае, если исполнитель в левой части не выбран, система доработана таким образом, что для выбранной операции автоматически назначаются оптимальный исполнитель и единица оборудования, исходя из расчета значения функции специализации, для рабочих смены и доступного оборудования.

Формирование сменных заданий

Подразделение: 045 Комплекс 45

Назначать: исполнителям рабочим центрам видам ПЦ

Операции: можно назначать все к назначению назначенные

Смены

Смена, Исполнитель	Свободно, ч	Загрузка, ч
06.11.2018 4507 Смена 1 (29)	54,2	36,7
Газизов Радик Наилевич...	1,5	6,5
Гакашев Руслан Заидов...		8,5
Галимов Ринат Максут...		8,9
Елькина Надежда Нико...		9,5
Калмацкий Константин ...	4,7	3,3
Кричмар Алексей Анат...	8,0	
Ксенофонтов Сергей А...	8,0	
Новожилов Сергей Анд...	8,0	
Нурмеев Рамис Назирович	8,0	
Тукачев Анатолий Иван...	8,0	
Ходырев Павел Алекса...	8,0	

Операция Участок (Технологические операции): 07

Номенклатура	Операция	Участ...	Количество	Время	Этап
84-06-893-01 Крышка к...	0060 Комбинир...	045-07	1,000	7,5 мин	0000-12129.1.1, Этап для обеспечения ДСЕ в...
84-06-893-02 Крышка к...	0060 Комбинир...	045-07	3,000	22,5 мин	0000-12130.1.1, Этап для обеспечения ДСЕ в...
294-1601-352 Дефлектор	0330 Транспор...	045-07	8,000	0,8 мин	0000-10805.1.2, 0300-0380/045 Мехобработка,...
294-1601-342 Дефлектор	0300 Токарная	045-07	8,000	571,2 мин	0000-10806.1.2, 0300-0380/045 Мехобработка,...
294-1601-342 Дефлектор	0485 Транспор...	045-07	8,000	0,8 мин	0000-10806.1.4, 0485-0560/045 Мехобработка,...
230-1600-741 Корпус	1000 Фрезерная	045-07	1,000	9,3 мин	0000-11693.1.2, 1000-1050/045 Мехобработка,...
230-1600-741 Корпус	1020 Слесарная	045-07	1,000	4,8 мин	0000-11693.1.2, 1000-1050/045 Мехобработка,...
7971.0273 Футорка сле...	0002 Пригироч...	045-07	99,000	990,0 мин	0000-11764.1.1, 0001-0009/642 Заготовительн...
266-1519-102 Обойма	0001 Фрезерная	045-07	30,000	3,0 мин	0000-11781.1.1, Передача материала в 642 цех

Настройка списка

Выбор: Добавить новый элемент порядка Удалить

Доступные поля: Спецификация, Способ распределения затрат, Срок до, Срочность выполнения работ

Поле: Этап.Срочность выполнения работ (Этапы... По убыванию

Направление сортировки: По убыванию

Список операций отсортирован по срочности

Завершить редактирование Отмена

## Рисунок 14 – Интерфейс формирования сменных заданий

Таким образом, для формирования сменного задания, достаточно либо последовательно выполнить назначение операций в автоматическом режиме, либо запустить режим полностью автоматического формирования задания. В результате работы система формирует документ «Сменное задание», который содержит все назначенные операции и в котором позже отмечается выполнение операций и собирается дополнительная информация (рисунок 15).

The screenshot displays two windows from a software application. The left window, titled 'Сменное задание 00-00005395 от 06.11.2018', shows a list of operations with columns for specification, quantity, status, executor, and center. The right window, titled 'Производственная операция 0000-12130.1.1.4 от 05...', shows details for a specific operation, including its stage, route, and execution parameters.

Спецификация	Изготови...	Колоче...	Статус	Исполнитель	Рабочий центр	Время
84-06-893-01 Кры...	0005 Фрезе...	1,000	Созд...	Газизов Радик...	MCU630Nz1_45...	
84-06-893-02 Кры...	0005 Фрезе...	3,000	Созд...	Газизов Радик...	MCU630Nz1_45...	
90-1606-120 Опора	0010 Слеса...	1,000	Созд...	Газизов Радик...	MCU630Nz1_45...	
84-06-893-01 Кры...	0010 Фрезе...	1,000	Созд...	Газизов Радик...	Matsuiuga_4507	
84-06-893-02 Кры...	0010 Фрезе...	3,000	Созд...	Газизов Радик...	Matsuiuga_4507	
90-1606-120 Опора	0020 Слеса...	1,000	Созд...	Газизов Радик...	Matsuiuga_4507	
84-06-893-01 Кры...	0020 Фрезе...	1,000	Созд...	Гакашев Русла...	MCU630Nz2_45...	
84-06-893-02 Кры...	0020 Фрезе...	3,000	Созд...	Гакашев Русла...	MCU630Nz2_45...	
90-1606-120 Опора	0030 Сверл...	1,000	Созд...	Газизов Радик...	MCU630Nz1_45...	
84-06-893-01 Кры...	0030 Фрезе...	1,000	Созд...	Галимов Ринат ...	4507_DMU50	
84-06-893-02 Кры...	0030 Фрезе...	3,000	Созд...	Галимов Ринат ...	4507_DMU50	
90-1606-120 Опора	0040 Слеса...	1,000	Созд...	Гакашев Русла...	MCU630Nz2_45...	
84-06-893-01 Кры...	0040 Слеса...	1,000	Созд...	Галимов Ринат ...	MCU630Nz2_45...	
84-06-893-02 Кры...	0040 Слеса...	3,000	Созд...	Галимов Ринат ...	MCU630Nz2_45...	
84-06-893-01 Кры...	0050 Комби...	1,000	Созд...	Калмацкий Конс...	4507_СТХ10_3	
84-06-893-02 Кры...	0050 Комби...	3,000	Созд...	Калмацкий Конс...	4507_СТХ10_3	
90-1606-120 Опора	0050 Трансп...	1,000	Созд...	Галимов Ринат ...	MCU630Nz2_45...	
230-1600-320 Корпус	0150 Расточ...	4,000	Созд...	Газизов Радик...		

Рисунок 15 – Сформированное сменное задание

Для каждой операции в сменном задании выбран исполнитель и назначена конкретная единица оборудования, на которой данная операция должна быть выполнена. При накоплении статистики данные, формируемые системой, становятся все точнее.

Внедрение алгоритмов автоматического формирования необходимо осуществлять после накопления достаточного массива статистических данных. На предприятии, на котором сформирован пример практического использования, такой период продолжался шесть месяцев. На момент начала функционирования системы количество ручных корректировок и отмен операций составлял ~16%, что является достаточно большим процентом неточности планирования. Кроме того, до 21% всех назначенных операций по результатам работы за смену отмечались как невыполненные, т.е. процент выполнения заданий составлял ~79%. По результатам трех месяцев опытной эксплуатации удалось снизить количество корректировок до ~10% и повысить процент выполнения заданий до ~94%.

В результате решения задачи оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов был разработан адекватный инструмент решения задачи оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования.

Диссертация направлена на практическую реализацию концепции интеллектуальной системы управления производственным предприятием. В результате проведенных исследований были обоснованы, разработаны и апробированы:

1. Концепция интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством, опирающейся на информационные источники генерируемые и хранимые в

автоматизированной системе управления для решения прикладных задач управления производством с использованием лучших практик оптимизации производства. Предложенная концепция создания интеллектуальной системы управления предприятия позволяет постепенно развивать существующие на предприятии автоматизированные системы управления с целью добавления интеллектуальных элементов и систему поддержки принятия решений. Практическая реализация и использование интеллектуальной системы управления производственным предприятием помогает перераспределить задачи между уровнями управления и значительно повысить оперативность и эффективность принимаемых решений, сделать управленческую деятельность более сбалансированной и обоснованной. Это позволяет предприятиям быстро реагировать на изменения внешней и внутренней среды, оперативно реагировать на возникающие проблемы и обеспечивать высокий уровень эффективности использования ресурсов. Выбранные подходы и технологии разработки (интеграционная шина данных, микросервисная архитектура построения приложений) системы позволили создать технологически-независимые кроссплатформенные решения при минимальных инвестиционных затратах, сжатых сроках разработки и короткому периоду выхода на окупаемость. Использование в качестве технологической платформы «1С Предприятие» и «1С ERP Управление предприятием 2» в качестве базового ERP-решения позволяет разработанной интеллектуальной системе управления быть тиражированной на более чем 6 000 предприятий в России и за рубежом. Получившееся в результате решение соответствует высоким требованиям, предъявляемым предприятиями к корпоративным информационным системам в части масштабируемости, отказоустойчивости и возможности адаптировать и развивать решения в ходе эксплуатации.

2. Модель и алгоритм решения задачи оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала. Модель, предназначена для расчета календарного плана производства, удовлетворяющего всем ограничениям задачи планирования и выполнять оптимизацию плана по критериям оптимальности календарного плана. Дополнительные функции позволяют балансировать важность критериев, таким образом, реализуется обобщенный критерий оптимальности в нечеткой постановке. Практическая реализация системы календарного планирования позволяет строить планы производства в среднем на 27% оптимальнее базовых механизмов планирования, существующих в ERP-системах, и почти на 40% эффективнее, чем это способны делать специалисты служб планирования без использования автоматизированных инструментов.
3. Модель и алгоритм синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства. Синхронизированная система управления мелкосерийным производством позволяет значительно повысить эффективность производства и радикально снизить уровень незавершенного производства. Апробация синхронизированной системы показала, что при использовании данного инструмент уровень незавершенного производства может быть снижен в девять раз, при одновременном снижении запасов в два раза. Данный результат позволяет предприятиям получить колоссальный экономический эффект от внедрения при общем снижении операционных затрат, необходимых для управления материальными запасами.
4. Модель и алгоритм решения задачи оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов, позволяющая сформировать оптимальный план выполнения технологических операций с учетом всех видов ограничений и различных критериев оптимальности (сроки производства, равномерность и комфортность). После внедрения Системы, точность оперативного планирования увеличена до ~94%, а количество корректировок снизилось до ~10%. Данный результат позволил минимизировать эффект накопленных отклонений, который является основной причиной срыва сроков производства. При этом операционная

нагрузка на сотрудников, осуществляющих оперативное планирование, снижается до 90%, что дает возможность сосредоточить внимание на возникающих отклонениях.

5. Модель поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия (интеллектуальный анализ и поиск решений), в т.ч. задача выбора наилучшего решения из заданного множества альтернатив, возникающая при некоторой сложившейся ситуации и требующая быстрого решения с учетом системного анализа ситуации и возможных последствий принятия управленческого решения. Разработанные методы выбора наилучшего решения позволили создать достаточно универсальный инструмент поддержки принятия коллективных решений, в условиях существования Парето-множества возможных альтернатив. Инструмент дает возможность провести комплексное оценивание альтернатив и принимать коллективные решения с минимизацией субъективных факторов.

Применение всех разработанных моделей одновременно дает синергетический эффект от реализации интеллектуальной системы управления предприятием. Оптимизация процессов управления предприятием на всех уровнях создает дополнительные положительные эффекты на систему управления в целом, минимизируя риски, снижая потери, в том числе минимизируя деятельность компании, не несущую ценности клиентам. Работоспособность и эффективность этих научных результатов подтверждена проведенным экспериментальным исследованием, актами внедрения и справками о применении результатов диссертационного исследования.

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### *Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ*

1. Федосеев С.А., **Вожаков А.В.**, Гитман М.Б. Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации // Проблемы управления. 2009, №5. С. 36-43.
2. Федосеев С.А., **Вожаков А.В.**, Гитман М.Б. Модель календарного планирования производства с нечеткими целями и ограничениями // Системы управления и информационные технологии, 2009, № 3 (37). С. 21-24.
3. **Вожаков А. В.**, Гитман М. Б., Федосеев С. А. Комплексное оценивание при выборе оптимального плана производства на тактическом уровне с учетом нечетких критериев и ограничений // Управление большими системами. Выпуск 30. М.: ИПУ РАН, 2010. С.164-179.
4. **Вожаков А.В.**, Евстратов С.Н., Столбов В.Ю. Автоматизация планирования производства в рамках единой информационной системы многопрофильного предприятия // Автоматизация в промышленности. 2012. №2. С.13-16.
5. **Вожаков А.В.**, Крюков О.В., Лесников Е.И. и др. Круглый стол о причинах недостаточно эффективного построения и эксплуатации систем автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2012. №2. С.38-47.
6. **Вожаков А.В.**, Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Ситуационный центр как инструмент интеллектуализации системы управления производством // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. №2. С.45-49.
7. **Вожаков А.В.**, Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Алгоритм принятия управленческих решений на базе ситуационного центра промышленного предприятия // Автоматизация в промышленности. 2014. №8. С.8-12.
8. **Вожаков А.В.**, Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Модели принятия коллективных решений в производственных системах // Управление большими системами. 2015. Выпуск 58. С.161-178.
9. **Вожаков А.В.** Синхронизированная система управления мелкосерийным производством // Автоматизация в промышленности. 2017. Выпуск №8. С. 6-10.

10. **Вожаков А.В.**, Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Задача синхронизации материальных потоков в мелкосерийном производстве // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Выпуск №1. С. 52-59.
11. **Вожаков А.В.** Задача оперативного управления производством с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при подборе ресурсов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Выпуск №1. С. 77-90.
12. **Вожаков А.В.**, Столбов В.Ю. Концепция интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. 2023. №2. С. 53-60.

***Публикации в изданиях WoS, Scopus***

1. **Vozhakov A.V.**, Yevstratov S.N., Stolbov V.Yu. Automation of Production Planning within an Integrated Information System of a Multi-Field Enterprise // Automation and Remote Control, 2014, Vol. 75. No. 7, pp. 1323-1329.
2. **Vozhakov A.**, Gitman M., Stolbov V. Synchronization and management of material flows in small-scale production // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. – pp. 622-626.
3. **Vozhakov A.** The Practice of Creating Intelligent Manufacture Management Systems Based on a ERP // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. vol 1352. – Springer, Cham, pp. 327–339.
4. **Vozhakov A.** Intelligent Scheduling in MES with the Fuzzy Information and Unclear Preferences // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. vol 381. – Springer, Cham, pp. 131–143.

***Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ***

1. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011615956. Автоматизированная система планирования производства и оптимизации / А.В. Вожаков, М.Б. Гитман, С.А. Федосеев. М.: РОСПАТЕНТ. Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2011.
2. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023684916. Программный комплекс управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства / А.В. Вожаков, В.Ю. Столбов, С.А. Федосеев. М.: РОСПАТЕНТ. Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 21.11.2023.

***Монографии***

1. Федосеев С.А., Гитман М.Б., Столбов В.Ю., Вожаков А.В. Управление качеством продукции на современных предприятиях: моногр. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – 229 с.
2. Вожаков А.В., Столбов В.Ю., Федосеев С.А. Интеллектуальные информационные системы управления предприятием: модели и практики: моногр. – М: Университетская книга, 2021. – 304 с.

***Прочие публикации по теме исследований***

1. Вожаков А.В., Гитман М.Б. Модель календарного планирования с нечеткими ограничениями // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2008, № 4. С. 79-82.
2. Вожаков А.В., Гитман М.Б. Модель календарного планирования с нечеткими ограничениями // Труды 35-й юбилейной международной конференции 6-й международной конференции молодых ученых «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + S&E '08». – Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 2008. С. 202-204.
3. Вожаков А.В., Гитман М.Б. Программное обеспечение системы календарного планирования производства в условиях нечеткости исходной информации // Тезисы



- докладов 17-й Всероссийской конференции молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках». – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. С. 18-19.
4. Вожаков А.В. Календарное планирование производством в условиях нечеткости информации // Материалы 5-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2008. С. 300-306.
  5. Вожаков А.В., Федосеев С.А., Гитман М.Б. План-график производства при нечетких целях и ограничениях // Труды 36-й международной конференции «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе IT + S&E '09». – Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 2009. С. 288-289.
  6. Федосеев С.А., Вожаков А.В., Гитман М.Б. Тактическое планирование производства при нечетких целях и ограничениях // Сборник научных трудов «Системы мониторинга и управления». – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2009. С. 237-243.
  7. Вожаков А.В. Управление дискретным производством с учетом нечетких ограничений на ресурсы предприятия // Материалы 6-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». – Ижевск: Изд-во ООО Информационно-издательский центр «Бон Анца», 2009. С. 89-97.
  8. Федосеев С.А., Вожаков А.В., Гитман М.Б. Модель оптимального планирования производства на тактическом уровне с нечеткими ограничениями и критериями // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2009, № 4. С. 78-89.
  9. Вожаков А.В., Гитман М.Б., Елисеев А.С. Выбор оптимального плана производства на тактическом уровне планирования // Труды VII Всероссийской школы-конференции «Управление большими системами» (27-29 мая 2010 года, Пермь). Том 2. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2010. – С.22-30.
  10. Вожаков А.В., Гитман М.Б., Евстратов С.Н. Задача перепланирования как часть комплексной задачи управления производством // Труды международной научно-практической конференции «Теория активных систем» (14-16 ноября 2011 года, Москва, Россия). Том 3. – М.: ИПУ РАН, 2011. – С.32-35.
  11. Вожаков А.В., Евстратов С.Н., Федосеев С.А. Принятие решений при операционном планировании производства с учетом требований потребителей // Труды международной научно-практической конференции «Теория активных систем – 2011». Под общей редакцией В.Н. Буркова, Д.А. Новикова. 2011. С. 119-123.
  12. Евстратов С.Н., Вожаков А.В. задача агрегирования информационных объектов управления производством // Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». 2012. С. 38-40.
  13. Вожаков А.В., Пустовойт К.С. модель перепланирования как важная составляющая системы управления производство // Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». 2012. С. 32-34.
  14. Вожаков А.В., Пустовойт К.С., Столбов В.Ю. Механизмы и модели синхронизации интересов потребителей и производителей при управлении промышленным предприятием // Материалы конференции "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах". Под редакцией С.Н. Васильева, И.А. Каляева, Д.А. Новикова, Г.Г. Себрякова. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2012. С. 923-927.
  15. Вожаков А.В., Столбов В.Ю., Гитман М.Б. Интеллектуальная система перепланирования производства с учетом интересов потребителя и производителя // Материалы XLI Междунар. конф. «IT-S&E'2013», Украина, Крым, Ялта- Гурзуф, 2013.- С.27-30.
  16. Вожаков А.В., Гитман М.Б. Алгоритм принятия управленческих решений на базе ситуационного центра промышленного предприятия // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2013 Москва, 16-19 июня 2014г. М.: ИПУ РАН, 2014. – С.4839-48455.



17. Вожаков А.В., Данилов А.Н. Разработка интеллектуальной системы управления промышленным предприятием на основе модели с открытым интерфейсом // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences.. 2015. № 2. С. 31-46.
18. Вожаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю., Елисеев А.С. Алгоритм принятия коллективных решений в рамках ситуационного центра промышленного предприятия // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences.. – 2015. – №2. –С.63-75.
19. Чимбур И.В., Вожаков А.В. модели многокритериального выбора при календарном планировании производства // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences.. 2015. № 3. С. 57-70.
20. Гитман М.Б., Федосеев С.А., Вожаков А.В. Математическое обеспечение процесса принятия коллективных решений в производственных системах // Материалы Всероссийской научной конференции по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург. 28-30 октября 2015 г.). Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 21-25.
21. Вожаков А.В. Синхронизированная система управления мелкосерийным производством // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences.. 2016. № 2. С. 27-37.
22. Вожаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Концепция интеллектуальной системы управления производством на базе лучших практик организации производства // Материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2017. С. 469-488.
23. Вожаков А.В. Оперативное управление производством с использованием базы знаний и интеллектуального подбора ресурсов // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. 2018. №1. С. 73-88.