

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук,

профессор В. Ю. Столбов

Пермь 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава 1. Проблемы управления современным производственным предприятием в условиях быстроменяющейся конъюнктуры рынка продукции.....	16
1.1. Промышленное предприятие как сложная система	16
1.2. Структурные уровни управления предприятием	18
1.3. Декомпозиция системы управления на бизнес-процессы и задачи управления	19
1.3.1 Описание бизнес-процессов	23
1.4. Моделирование бизнес-процессов.....	26
1.4.1 Основные принципы моделирования бизнес-процессов	26
1.4.2 Нотация и модель бизнес-процессов	27
1.5. Анализ существующих практик управления производственными системами.....	30
1.5.1. Бережливое производство	31
1.5.2. Теория ограничений в управлении производством.....	51
1.5.3. Быстрореагирующее производство (QRM).....	56
1.5.4. Сетецентрическое производство	61
1.6. Автоматизированные системы управления производством.....	63
1.6.1 История возникновения автоматизированных систем управления предприятием.....	67
1.6.2 Планирование запасов по точке перезаказа	68
1.6.3 Технология MRP	70
1.6.4 Технология MRPI/CRP	73
1.6.5 Замкнутый цикл MRP (Closed loop MRP)	76
1.6.6 Планирование ресурсов производства MRP II.....	78
1.6.7 Планирование в APS.....	82
1.6.8 Планирование в MES.....	84
1.6.9 Планирование ресурсов предприятия ERP	87
1.6.5 Цифровое производство	90
1.7. Необходимость интеллектуализации системы управления	93
Выводы по главе	97
Глава 2. Концепция интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством	99
2.1. Интеллектуальное предприятие	99

2.1.1 Экономические и социальные предпосылки появления интеллектуальных предприятий.....	99
2.2.1 Основные признаки интеллектуального предприятия.....	103
2.2. Бизнес-анализ и поддержка принятия решений	110
2.2.1 Продукционная модель представления знаний. Графы и деревья	112
2.2.2 Использование теории нечетких множеств для обработки знаний.....	117
2.2.3 Формирование и обновление базы знаний	121
2.2.4 Алгоритмы логического вывода.....	124
2.2.5 Пример логического вывода	126
2.3. Интеллектуальная система управления.....	129
2.3. Интеллектуальные элементы.....	132
2.4. Симбиоз автоматизации и рационализации производства	133
2.5. Открытые внутренние и внешние интерфейсы системы.....	136
2.6. Ситуационный центр промышленного предприятия.....	140
Выводы по главе	141
Глава 3. Основные интеллектуальные задачи, решаемые в рамках автоматизированной системы управления производством.....	145
3.1. Задача оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала.....	147
Постановка задачи	148
Математическая постановка.....	153
3.2. Задача синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства.....	159
Постановка задачи	162
3.3. Задача оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов	169
Содержательная постановка	169
Математическая постановка	177
3.4. Задача поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия (интеллектуальный анализ и поиск решений).....	181
Постановка задачи поддержки коллективного решения	183

Модели голосования Кондорсе и Борда	186
Модели многокритериального выбора при принятии коллективных решений	191
Выводы по главе	197
Глава 4. Применение методов математического и имитационного моделирования при решении интеллектуальных задач управления	199
4.1. Математическая модель календарного планирования	205
4.2. Математическая модель синхронизации производственных процессов	223
4.3. Задача оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов. Решение тестовых задач	238
Алгоритм решения задачи формирования сменных заданий	238
4.4. Математическая модель принятия коллективных решений на базе единой информационной системы промышленного предприятия	242
Демонстрационный пример применения моделей многокритериального выбора	242
Алгоритм принятия коллективных решений в рамках ситуационного центра предприятия	247
Выводы по главе	249
Глава 5. Практическая реализация автоматизированной интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства	251
5.1. Технологические платформы интеллектуальных систем управления предприятием	251
5.2. Описание подсистем и базовой функциональности	253
5.1.2 Управление продажами	257
5.1.3 Управление производством	259
5.1.4 Управление закупками	263
5.3. Дополнительные программные решения для покрытия функциональных разрывов	265
5.4. Архитектура информационной системы предприятия	268
5.5. Подходы к реализации интеллектуальных элементов	278
Доработка типовой	279
Расширения	280
Внешний сервис	282
5.6. Техническое описание решения	285

5.7. Структура интеллектуальной системы управления	293
Сценарии моделирования	296
Задачи оптимизации	297
Ограничения задач оптимизации	297
Критерии оптимальности.....	301
Оценка важности критериев оптимальности	301
Статусы партий в производстве	302
Карточки синхронизации	302
Оценки экспертов	302
Принятые решения	303
5.8. База знаний	303
5.9. Порядок выполнения работ по разработке системы	306
Выводы по главе	309
Глава 6. Апробация разработанной автоматизированной интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях реального производства	311
6.1. Порядок проведения испытаний системы и ее компонентов.....	311
6.2. Система календарного планирования производства.....	316
6.3. Подсистема синхронизации производства, встраиваемая в ERP	337
6.4. Развитие встроенного MES для интеллектуального управления внутри цеха.....	346
Выводы по главе	354
Заключение.....	355
Список литературы.....	363
Приложение №1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматизированная система планирования производства и оптимизации».....	395
Приложение №2 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства».....	396
Приложение №3 Акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «ИБС Софт».....	398
Приложение №4 Акт о внедрении ПАО «Мотовилихинские заводы»	399
Приложение №5 Акт о внедрении ЗАО «Третий Спецмаш»	401
Приложение №6 Акт о внедрении ООО «Геликон Консалтинг»	402

Введение

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), быстрореагирующее 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. Тиля 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 нечёткой 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:

- Изучить теоретические основы и мировой опыт управления современным производственным предприятием в условиях быстроменяющейся конъюнктуры рынка продукции, подходы к разрешению проблем управления и влиянию на объект управления.
- Разработать концепцию интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством с использованием

существующих информационных систем и применению практик управления производственными системами.

- Определить и проанализировать основные задачи, решаемые в рамках интеллектуальной системы управления производством.
- Решить интеллектуальные задачи управления с применением методов математического и имитационного моделирования.
- 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, отличающиеся 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, отличающиеся 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, которые отличаются крайне низкими

требованиями к полноте и качеству нормативно-справочной информации о технологии производства изделий, требуемой для получения рационального решения.

5. Новую постановку и алгоритм задачи поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия, которые отличаются учетом специфики предметной области и учетом дополнительных ограничений на параметры эффективности производства.
6. Разработку узкоспециализированных эвристических методов и алгоритмов решения интеллектуальных задач управления, отличающиеся от известных численных методов оптимизации более высокой скоростью нахождения близких к оптимальным решениям поставленных задач.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования состоит:

- 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 исследования. В качестве теоретической основы исследования рассматривались положения теории систем, теории управления, теории информации, информационного анализа, теории проектирования и теории 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 и обработки информации.
- Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.
- Разработка специального математического и программного обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.
- Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических, экономических, биологических, медицинских и социальных объектов.
- Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических, экономических, биологических, медицинских и социальных системах.
- Методы получения, анализа и обработки экспертной информации.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Концепция интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством, опирающаяся 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 мелкосерийного производства продукции 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», ЗАО «Третий Спецмаш», а также на множестве проектов комплексной автоматизации промышленных предприятий, выполняемых ООО «ИБС Софт», ООО «Геликон Консалтинг» 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 16 международных и отечественных конференциях:

1. Международная конференция «Advances in Digital Science», 19–21 February 2021, Salvador, Brazil. ICADS 2021, on. Advances in Intelligent Systems and Computing 2021.

2. Международная конференция «Digital Science», 15.10.2021, Luxembourg. DSIC 2021.
3. 35-я юбилейная международная конференция молодых ученых «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + S&E '08» 2008.
4. 17-я всероссийская конференция молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках» 2008.
5. 5-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» 2008.
6. 36-я международная конференция «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе IT + S&E '09» 2009.
7. 6-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» 2009.
8. VII Всероссийская школа-конференция «Управление большими системами».
9. Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем» (14-16 ноября 2011 года, Москва, Россия).
10. Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем – 2011».
11. IX Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». 2012.
12. Конференция "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах", 2012.
13. XLI Международная конференция «IT-S&E'2013», Украина, Крым, Ялта- Гурзуф.
14. XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2013 Москва, 16-19 июня 2014г.
15. Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург. 28-30 октября 2015 г.).
16. XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». Пермь, 2017.
17. XIX Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». Челябинск, 2022.

Публикации по материалам диссертационной работы:

2 монографии, 11 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 6 приложений. Общий объем – 397 стр., из которых: оглавление - 4 стр., основного текста – 357 стр. (таблиц – 37, рисунков – 104), библиография - 31 стр. (247 наименований), приложения – 7 стр.

Глава 1. Проблемы управления современным производственным предприятием в условиях быстроменяющейся конъюнктуры рынка продукции

1.1. Промышленное предприятие как сложная система

С точки зрения теории систем, совокупность процессов, существующих на крупном промышленном предприятии, является большой и сложной системой со множеством элементов и внутренних связей (далее по тексту – производственная система), действующей в условиях внешнего рынка [1]. На рисунке 1 представлено схематичное изображение производственной системы.



Рисунок 1 – Модель производственной системы

В работах [1, 2] исследователи характеризуют большую систему как совокупность значительного числа иерархически связанных сложных систем. В состав больших систем входят как технические элементы (станки, оборудование, производственные линии, вычислительная техника), так и социальные (люди, объединенные в группы по функциональному или иному признаку – далее участники), что определяет ее как частный случай

социально-технической системы. Элементы системы объединены системой связей (информационных, материальных и иных) для обеспечения деятельности системы как единого целого. Кроме того, для сложных систем характерным является недостаточная информационная проницаемость при обилии информации различного рода, что негативно влияет на эффективность управления.

В процессе своей деятельности предприятие находится в постоянном взаимодействии с внешней средой, получая с рынка трудовые, материальные и финансовые ресурсы, технологии реализуя при этом готовую продукцию и услуги. Для обеспечения эффективности взаимодействия предприятие находится в постоянном информационном взаимодействии с элементами внешней среды, реагируя на изменения внешней среды в том числе путем изменений внутренней структуры в ответ на внешние изменения.

Объектом управления выступает техническая система, осуществляющая производственные и логистические процессы, а субъектом управления клиенты компании и заинтересованные лица (собственники, сотрудники, поставщики ресурсов, общество в целом).

Основной целью существования предприятия является получение прибыли, которое в свою очередь зависит от эффективной работы всех участников процессов и внешних факторов. Таким образом цели декомпозируются в иерархию целей, достижение которых в свою очередь измеряется достижением ключевых показателей. Такая декомпозиция происходит до тех пор, пока для каждого участника системы не будут определены цели и показатели. При этом как правило, участники производственной системы обладают определенной свободой принятия самостоятельных решений в рамках деятельности компании при

соблюдении правил и стандартов компании. Лицо принимающее решение – это индивидуум или группа индивидуумов, имеющих право принимать окончательные решения по выбору одного или нескольких управляющих воздействий [1].

В данной работе 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 (главный календарный план производства, ГКПП) [3, 4].

1.2. Структурные уровни управления предприятием

Процессы управления производственной системой могут быть дополнительно классифицированы по уровням управления, характеризующимся различным составом решаемых задач и горизонтами планирования (таблица 1.). В работе [5] предложена следующая классификация задач по уровням управления:

1. «На стратегическом уровне происходит разработка и реализация действий, ведущих к долгосрочному превышению уровня результативности деятельности предприятия над уровнем конкурентов. На данном уровне решаются такие задачи, как анализ внешней среды и внутренней обстановки, выбор и разработка стратегии на уровне стратегической зоны хозяйствования, проектирование организационной структуры, выбор степени интеграции и систем управления, определение нормативов поведения и политики в отдельных сферах ее деятельности, обеспечение обратной связи результатов и стратегии. Стратегическое управление обычно охватывает период времени 1...5 лет, минимальный шаг планирования – 1 месяц.

2. На уровне тактического управления осуществляется среднесрочное планирование хозяйственной деятельности предприятия, формируются портфели заказов на продукцию, разрабатываются планы закупок, планы продаж, планы производства и т.д. Горизонт планирования 1...6 месяцев (в зависимости от длины производственного цикла предприятия). Детализация плана производится по дням.
3. Уровень оперативного управления – уровень выполнения конкретных действий и учета фактической деятельности, на основе планов, полученных с более высоких уровней управления».

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

1.3. Декомпозиция системы управления на бизнес-процессы и задачи управления

Устоявшимся является подход к декомпозиции системы управления предприятием на бизнес-процессы, которые в свою очередь делятся на управляющие, основные и обеспечивающие [5, 6, 7]. Бизнес-процесс – это совокупность взаимосвязанных мероприятий или работ, направленных на создание определённого продукта или услуги для потребителей (как внешних, так и внутренних).

Описанию деятельности предприятия как системы бизнес-процессов компании посвящены теоретические и практические работы многих исследователей [8, 9], в рамках данной работы изложение данного раздела

носит обзорный характер в объеме, необходимом для освящения используемых методов и инструментов моделирования процессов.

Несмотря на распространенность методов моделирования бизнес-процессов компаний и высокой стандартизации, на сегодня не существует универсальной модели бизнес-процессов, предприятия выполняют декомпозицию бизнес-процессов исходя из специфики деятельности компании. В работе [10] представлен наиболее простой пример декомпозиции процессов по уровням управления (рисунок 2): «Особенность данной декомпозиции заключается в том, что процессы отнесены к одной из двух категорий: основная деятельность, обеспечение. Бизнес-процессы основной деятельности предприятия – это бизнес-процессы, создающие добавленную стоимость, или же (экономика и финансы) являющиеся управляющими процессами, влияющими на деятельность предприятия в целом. Обеспечивающие бизнес-процессы не участвуют напрямую в процессе создания добавленной стоимости, однако, от качества работы обеспечивающих бизнес-процессов будет зависеть способность предприятия осуществлять основную деятельность».



Рисунок 2 – Система бизнес-процессов производственного предприятия

В таблице 2 представлена более сложная модель процессов, называемая M21 [11], многие компании используют данную модель в качестве отправной точки, адаптируя ее под себя.

Код	Уровень	Наименование
М.	1	Процессы управления
M1.	2	Стратегическое управление
M2.	2	Управление финансами
M3.	2	Управленческий учет (УУ, РУ, НУ)
M4.	2	Экономическое управление
M5.	2	Управление маркетингом
M6.	2	Логистическое управление (Сквозное планирование)
M7.	2	Организационное управление
M8.	2	Управление персоналом
В.	1	Основные процессы
B1.	2	Закупка ТМЦ
B2.	2	Производство продукции
B3.	2	Продажа продукции
B4.	2	Транспортировка ТМЦ и продукции
B5.	2	Складирование ТМЦ
С.	1	Обеспечивающие процессы
S1.	2	Административно-хозяйственное обеспечение
S2.	2	Информационное обеспечение
S3.	2	Обеспечение безопасности
S4.	2	Техническое обеспечение
S5.	2	Обеспечение финансовых операций
S6.	2	Обеспечение документооборота
S7.	2	Консультационное и аудиторское обеспечение
S8.	2	Обеспечение социальной сферы

Далее, рассмотрим общую форму результата решения задачи:

1. Для задачи планирования результатом решения будет «план действий», рассчитанный с необходимой степенью детализации и удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к результатам планирования.
2. Для задачи учета выполнения плана результатом будет организованная система учета информации о выполнении плана с необходимой степенью детализации, достоверности и оперативности формирования данных.
3. В результате анализа выявляются отклонения фактического состояния системы от планируемого, выявляются различные факторы возникновения ситуации, прогнозируются последующие состояния системы.
4. В результате управляющего воздействия должен быть сформулирован набор заданий с установленными сроками, ответственными (должностные лица или подразделения организационной структуры) и лимитами передаваемых полномочий для реализации управляющих воздействий.»

На рисунке 3 изображены основные задачи управления производством, разнесенные по уровням управления.

Система управления предприятием					
Обеспечение производства			Производство		
Стратегическое управление	Развитие и поддержка инфраструктуры	Развития персонала	Развитие взаимоотношений с поставщиками	Развитие производственной площадки	Формирование программы и целей в области качества
	Управление парком оборудования: модернизация, установка...	Управление персоналом: потребность, комплектация	Управление запасами: нормирование, места размещения	Управление портфелем заказов: договоры, сроки, график отгрузки	Формирование и реализация мероприятий по повышению качества
Тактическое управление	Формирование графика плановых ремонтов оборудования	Формирование графика работы персонала	Планирование поставок материалов и комплектующих	Календарное планирование производства	Планирование целевых показателей качества
	Оперативное управление оборудованием	Формирование сменно-суточных заданий	Оперативное планирование и контроль перемещений	Оперативное планирование и контроль производства	Контроль качества, анализ дефектов и причин возникновения
Оперативное управление	Система мониторинга оборудования	Ввод данных о выполнении заданий	Ввод первичных документов: М-11, МХ-18	Ввод данных о факте выполнения плана производства	Ввод данных о результатах контроля качества

Рисунок 3 – Задачи по уровням управления и бизнес-процессам

Моделирование бизнес-процессов является важнейшими инструментами используемым при автоматизации процессов компании и разработке стандартов предприятия. Автоматизация процессов использует саморегулирующие технические средства и математические методы с целью освобождения человека от участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов, изделий или информации, либо существенного уменьшения степени этого участия или трудоёмкости выполняемых операций [12, 13].

1.3.1 Описание бизнес-процессов

В работах [11, 10] бизнес-процесс рассматривается как «логически завершенная цепочка взаимосвязанных и повторяющихся видов деятельности, в результате которых ресурсы предприятия используются для переработки объекта с целью достижения определенных измеримых результатов или создания продукции для удовлетворения внутренних или внешних потребителей. В качестве клиента бизнес-процесса может

выступать другой бизнес-процесс. В цепочку обычно входят операции, которые выполняются по определенным бизнес-правилам. Под бизнес-правилами понимают способы реализации бизнес-функций в рамках бизнес-процесса, а также характеристики и условия выполнения бизнес-процесса. Составляющие бизнес-процесс действия, могут выполняться людьми (вручную, или с применением компьютерных средств, или механизмов) или быть полностью автоматизированы. Порядок выполнения действий и эффективность работы того, кто выполняет действие, определяют общую эффективность бизнес-процесса. Задачей каждого предприятия, стремящегося к совершенствованию своей деятельности, является построение таких бизнес-процессов, которые были бы эффективны и включали только действительно необходимые действия».

Моделирование бизнес-процессов часто предшествует автоматизации бизнес-процессов являясь одним из этапов реализации проектов комплексной автоматизации систем управления компаний [14, 15, 16]. Основной целью моделирования бизнес-процессов является описание реального хода бизнес-процессов компании [17], для обеспечения прозрачности бизнес-процессов, необходимую для оценки качества и эффективности выполнения процесса.

В работах [10, 11] моделью бизнес-процесса называется «формализованное (графическое, табличное, текстовое, символьное) описание, отражающее реально существующую или предполагаемую деятельность предприятия. Модель, как правило, содержит следующие сведения о бизнес-процессе [11]:

- набор составляющих процесс шагов — бизнес-функций;
- порядок выполнения бизнес-функций;
- механизмы контроля и управления в рамках бизнес-процесса;
- исполнителей каждой бизнес-функции;

- входящие документы/информацию, исходящие документы/информацию;
- ресурсы, необходимые для выполнения каждой бизнес-функции;
- документацию/условия, регламентирующие выполнение каждой бизнес-функции;
- параметры, характеризующие выполнение бизнес-функций и процесса в целом.»

На сегодняшний день существуют различные методологии бизнес-моделирования с уникальным синтаксисом и семантикой [11]:

1. ARIS
2. Catalyst компании CSC,
3. Business Genetics,
4. SCOR (Supply\Chain Operations Reference),
5. POEM (Process Oriented Enterprise Modeling)

Важно различать функциональный и объектно-ориентированный подходы к моделированию процессов, детально описанные в [9]. В функциональном подходе главным элементом является бизнес-функция, а моделируемая система представляется в виде системы взаимосвязанных функций. При объектно-ориентированном подходе система разбивается на набор объектов, соответствующих объектам реального мира и взаимодействующих между собой посредством посылки сообщений.

Объектно-ориентированный подход разделяет пассивные объекты (материалы, документы, оборудование), над которыми выполняются действия, и активные объекты (организационные единицы, конкретные исполнители, программное обеспечение), которые осуществляют действия. Такой подход позволяет объективно определить операции над объектами и целесообразность использования объектов процесса. Недостаток объектно-ориентированного подхода состоит в меньшей наглядности конкретных бизнес-процессов [5].

Ключевая сущность методов моделирования – связи, которые используются для описания отношений объектов и/или операций друг с другом. К числу таких взаимоотношений могут относиться: последовательность выполнения во времени, связь с помощью потока информации, использование другим объектом и т.д.

Инструменты моделирования могут использоваться компаниями для решения различных задач, что определяет типы используемых моделей. Однако следует отметить, что именно графические модели процессов являются наиболее понятными для чтения специалистами, не обладающими специализированными знаниями и навыками моделирования, что делает графические модели наиболее полезными при практическом использовании. Остальные типы моделей следует считать специализированными (предназначенными для решения отдельных задач [18]):

- *функциональные*, описывающие совокупность выполняемых системой функций и их входы, и выходы;
- *поведенческие*, показывающие, когда и/или при каких условиях выполняются бизнес-функции с помощью таких категорий, как состояние системы, событие, переход из одного состояния в другое, условия перехода, последовательность событий;
- *структурные*, характеризующие морфологию системы — состав подсистем, их взаимосвязи;
- *информационные*, отражающие структуры данных — их состав и взаимосвязи.

1.4. Моделирование бизнес-процессов

1.4.1 Основные принципы моделирования бизнес-процессов

Моделирование бизнес-процессов может быть направлено на решение различных задач:

- Определить выходы процессов и места и эффективность их использования.
- Понять состав выполняемых в рамках процесса операций.
- Установить последовательность операций.
- Установить участников процессов и заинтересованные стороны.
- Определить ресурсы, потребляемые бизнес-процессом.
- Установить информационные связи между участниками.
- Изучить документооборот, определить ключевые и избыточные документы.
- Выявить узкие места процессов.
- Стандартизировать работу компании.
- Обучение персонала процессам компании.
- Автоматизировать процессы.
- Повысить прозрачность процессов.

Первым этапом разрабатываются модели в состоянии «как есть» на основании интервью участников процесса и другой доступной информации.

В рамках построения модели должны быть установлены:

1. Выходы процесса.
2. Последовательность операций, составляющих процесс.
3. Порядок работы с отклонениями.
4. Ресурсы, необходимые для выполнения процесса.
5. Цели процесса.
6. Показатели эффективности процесса.
7. Инструменты, оборудование и программное обеспечение, используемое при выполнении операций процесса.

1.4.2 Нотация и модель бизнес-процессов

Моделирование процессов является важным инструментом повышения эффективности компании, от выбора нотации и инструментов

моделирования во многом будет зависеть успешность выполнения дальнейших шагов.

Существует множество различных нотаций моделирования процессов:

- UML (Unified Modeling Language, Унифицированный язык моделирования): Activity Diagram (диаграмма деятельности), EDOC (Enterprise Distributed Object Computing, корпоративная распределенная обработка объектов) – Business Processes (бизнес-процессы);
- IDEF (SADT);
- ebXML (Electronic Business eXtensible Markup Language, расширяемый язык разметки для электронного бизнеса) BPSS (Business Process Specification Schema, схемы спецификации бизнес-процессов);
- ADF (Activity-Decision Flow, поток «деятельность-результат») Diagram;
- RosettaNet;
- LOVEM (Line of Visibility Engineering Methodology, визуальная методология проектирования);
- EPC.

Однако, наиболее современной и универсальной нотацией является BPMN2.0 [18] (Business Process Model and Notation, нотация и модель бизнес-процессов). BPMN2.0 описывает условные обозначения для отображения бизнес-процессов в виде диаграмм бизнес-процессов и ориентирована как на технических специалистов, так и на бизнес-пользователей. Для этого язык использует базовый набор интуитивно понятных элементов, которые позволяют определять сложные семантические конструкции. Существуют инструменты выгрузки моделей в исполняемые модели на языке BPEL.

Элементы (символы) графической нотации BPMN по назначению объединены в категории [18]:

- объекты потока (Flow Objects);
- данные (Data);
- зоны ответственности (Swimlanes);
- соединяющие элементы (Connecting Objects);
- артефакты (Artifacts).

На рисунке 4 приведен пример использования нотации.

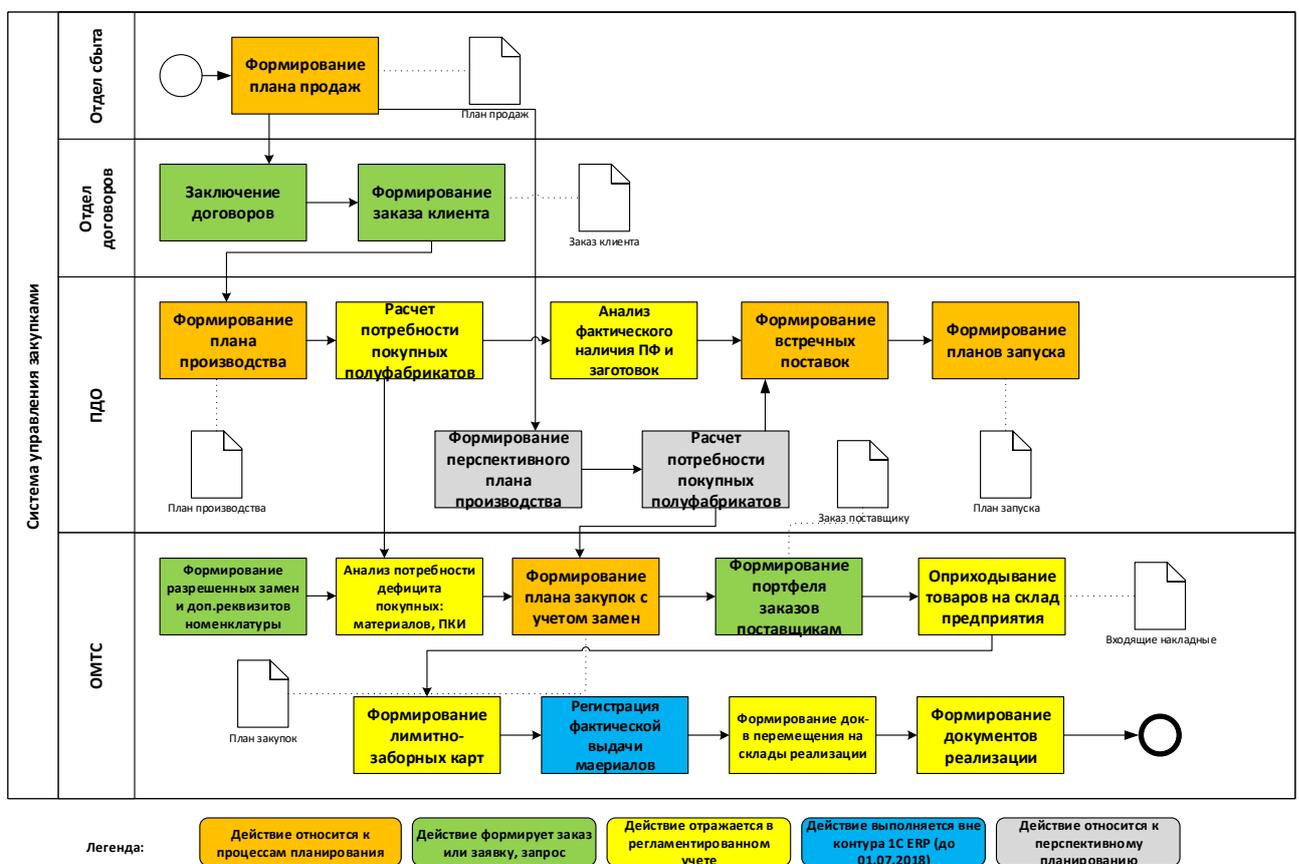


Рисунок 4 – Пример BPMN диаграммы

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.

1.5. Анализ существующих практик управления производственными системами

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 [19, 20 21, 22].

2. Теория ограничений (Theory of Constraints, ТОС) — 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 [23, 24, 25, 26].

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 [27, 28, 29].

4. Сетецентрическое производство (Network-Centric Manufacturing, NCM) – управленческая концепция, основанная на децентрализованном подходе управления, предусматривающем формирование самоорганизующихся распределенных систем группового управления на тактическом уровне [12, 13, 30].

1.5.1. Бережливое производство

Ценность и потери

Бережливое производство призвана оптимизировать процессы, исключая операции, которые не добавляют ценности продукту и являющихся причиной возникновения так называемых "скрытых потерь" деятельности компании [31]. Практика Lean подразумевает ориентацию на создание ценности для потребителя и использоваться во всех аспектах деятельности компании. Основные принципы концепции были разработаны для производственной системы компании Toyota и с тех пор стали известны по всему миру и применяются на тысячах производств и даже в непромышленных компаниях, например в области информационных технологий. Как оказалось, принципы создания ценности для потребителя также хорошо применимы к процессам создания программного обеспечения, как и к производству автомобилей. За этими словами стоит не только детально проработанный набор инструментов повышения эффективности производства [32], но и философия ведения бизнеса компании и набор ценностей, которые должны разделять все сотрудники компании. Подразумевается, что оптимизации будут подвергнуты все бизнес-процессы компании.

Ключевым является понятие *ценности для клиента*, которое очень сложно формализовать. Когда производственник, инженер или продавец товара размышляют о ценности товара или услуги, они, часто, представляют себе не то, что действительно важно реальному клиенту. Инженер продукта думает, что клиенту важны сверхтехнологичные функции продукта, продавец считает, что клиенту важны эксклюзивные условия заключения сделки и т.д., а реальные клиенты могут иметь о ценности продукта совсем другие представления. Как часто потребитель сталкивается с ненужными функциями продуктов, насколько часто срок выполнения заказа важнее цены и т.д. В попытке разобраться в ценности для потребителя разработаны

методики получения обратной связи от клиентов как на стадии производства, так и на ранних стадиях создания продукта (создание прототипа), появились профессиональные менеджеры «владельцы продукта», задачами которых является выполнение роли заказчика продукта, управлять созданием ценности для клиента, взаимодействовать с реальными клиентами и получать от них обратную связь. То насколько компания понимает ценность продукта для потребителя будет определять в итоге и полезность применения инструментов бережливого производства и сокращения потерь, о которых пойдет речь далее.

В период между 1948 и 1975 годами руководители компании Toyota Тайити Оно, Сигео Синго и Эйджи Тойода разработали принципы рационального управления производством, позже названные как «Производственная система Toyota» [21].

Один из основоположников созданной системы Тайити Оно [20] выделил «семь видов *потерь*»:

- 1) потери из-за перепроизводства;
- 2) потери времени из-за ожидания;
- 3) потери при ненужной транспортировке;
- 4) потери из-за лишних этапов обработки;
- 5) потери из-за лишних запасов;
- 6) потери из-за ненужных перемещений;
- 7) потери из-за выпуска дефектной продукции,

которые необходимо минимизировать».

Концепция Lean Production возникла в 1980-х годах как интерпретация идей «Производственной системы Toyota» ее американскими исследователями. Авторы концепции Джон Крафчик, Джеймс Вумек, Дэниел Джонс и Джеффри Лайкер [21, 22].

Один из авторов концепции Джеффри Лайкер дополнил указанные ранее Тайити Оно потери еще одним видом:

8) нереализованный творческий потенциал сотрудников.

Инструменты бережливого производства являются практическими подходами к систематическому устранению всех видов потерь в процессах, для максимального увеличения ценности продукта и минимизации затрат. Практика фокусирования на непрерывном совершенствовании процессов производства, разработки, вспомогательных бизнес-процессов и управления, а также всех аспектов жизни получила японское название Кайдзен (означает улучшение). Основными инструментами бережливого производства являются [20, 22]:

- 1) выравнивание производства;
- 2) система 5S;
- 3) визуализация;
- 4) канбан – вытягивающая система;
- 5) всеобщий уход за оборудованием (TPM);
- 6) быстрая переналадка (SMED);
- 7) автономизация;
- 8) пока-ёкэ (защита от ошибок);
- 9) сокращение партий и поток единичных изделий.

Выравнивание производства

Для того, чтобы понять методы выравнивания производства лучше всего обратиться к истокам. Первая конвейерная линия Генри Форда, введенная в строй в апреле 1913 г., использовалась для сборки генераторов. До этого времени один рабочий мог собрать от 25 до 30 генераторов за девятичасовой рабочий день. Это означало, что на сборку одного генератора затрачивалось около 20 минут. Новая линия разбила данный процесс на 29 операций, выполняемых отдельными рабочими с отдельными узлами генератора, которые доставлял к ним постояннодвигающийся конвейер. Новый подход сократил время сборки одного генератора в среднем до 13 минут. Через год удалось разбить производственный процесс на 84 операции, и время сборки

одного генератора сократилось до 5 минут. Время необходимое для изготовления одного изделия называется временем такта. Вскоре Генри Форд применил конвейер для сборки легендарной модели «Форд-Т». Пример с производством Форда знаком всем с детства, но важно отметить основные принципы, заложенные в конвейерную линию:

1. Линия движется непрерывно, с одной скоростью.
2. Через каждое время такта с линии выходит готовое изделие.
3. Если на одном из участков конвейера не хватило времени для выполнения операций – все производство останавливается, что гарантирует убытки в виде упущенной прибыли. Простой длиной во время такта, означает убыток в сумме стоимости готового изделия.
4. Для исключения ситуаций остановки конвейера операции между рабочими распределяются таким образом, чтобы за время такта рабочий мог гарантировано выполнить свою часть операций.

Модель «Т» стала первым автомобилем, собранным на конвейере. Машина выпускалась, ради экономии, только чёрного цвета и оставалась до 1927 года единственной выпускавшейся Фордом. В 1924 году половина всех автомобилей в мире была марки «Форд-Т». Она почти без изменений выпускалась в течение 20 лет. Всего было выпущено около 15 миллионов автомобилей. Кроме этого, автомобилю обеспечила успех и сравнительно низкая стоимость: производство ведь стало массовым. С 850 долларов она снизилась до 290. Фордовский автомобиль дешёвел. Но в 20-х годах устаревшую модель стали теснить «Шевроле», «Плимуты» и другие. Форду пришлось остановить свои заводы, уволить большую часть рабочих и переналаживать производство.

В этой истории хорошо видна отправная точка, от которой начала развиваться производственная система Тойоты. Принципы конвейера Форда работают для одного изделия, выпускающегося длительное время.

Но эти принципы касались только сборки изделия, в то время как обработка деталей велась методом «партий и очередей». Например, штамповочные производства, для снижения переналадок и дефектов как правило работали гигантскими партиями, выпуская за один раз месячную потребность деталей. По таким принципам работала вся промышленность США, снижая затраты на единицу товара, не видя потерь, связанных с перепроизводством, ожиданием, излишних запасов и так далее.

Инструменты бережливого производства позволяют выполнить выравнивание потоков на всех стадиях производства и обеспечив при этом широкий ассортимент выпускаемых изделий, производимых под постоянно изменяющийся спрос. Концепция бережливого производства предлагает взять лучшее из идей Форда — метод потока, но адаптировать его к современным условиям – вместо массового производства методом «партий и очередей» применить непрерывный поток малых партий вплоть до единичных изделий.

В работах посвященных изучению производственной системе Тойота также выделяется метод [31, 33] Хейдзунка – «выравнивание производства и графика работ представляет собой выравнивание производства как по объему, так и по номенклатуре изделий. Чтобы предотвратить резкие взлеты и падения, продукция выпускается не в порядке поступления заказов потребителя. Сначала в течение некоторого периода собираются заказы, после чего их выполнение планируется таким образом, чтобы каждый день производить одинаковый ассортимент продукции в одинаковом количестве».

Данный метод используется для снижения себестоимости продукции в условиях серийного производства. Переналадка оборудования ведет к простоям станков, пролеживанию материальных ресурсов и другим видам потерь. До Тойоты для минимизации простоев на производстве просто увеличивали партию обрабатываемых деталей, что увеличивает уровень

незавершенного производства и запасов, которые затем расходуются в течение длительного времени. Метод *хейдзунка* предлагает использовать быструю переналадку и другие инструменты бережливого производства, чтобы минимизировать потери связанные с переналадкой оборудования при смене типа обрабатываемого изделия. Данный подход не раз доказал свою эффективность в условиях, когда возможность его применения была неочевидна.

Система 5S

Самым простым, но при этом важнейшим инструментом бережливого производства, является система 5S [21] – «система организации и рационализации рабочего места (рабочего пространства), состоящая из пяти шагов:

1. сэири «сортировка» (нужное — ненужное) — чёткое разделение вещей на нужные и ненужные и избавление от последних;
2. сэитон «соблюдение порядка» (аккуратность) — упорядоченное и точное расположение и хранение необходимых вещей, которое позволяет быстро и просто их найти и использовать;
3. сэисо «содержание в чистоте» (уборка) — содержание рабочего места в чистоте и опрятности;
4. сэикэцу «стандартизация» (установление норм и правил) — необходимое условие для выполнения первых трёх правил;
5. сицукэ («совершенствование») — воспитание привычки точного выполнения установленных правил, процедур и технологических операций».

Система представляет собой универсальный набор принципов, применение которых позволяют повысить уровень качества готовых изделий, систематизировать процессы в производстве и снизить производственный травматизм при общем повышении эффективности производственных процессов и улучшений условий труда сотрудников.

Концепция подразумевает, что каждый сотрудник предприятия — от уборщицы до директора — выполняют 5 правил; основной плюс — эти действия не требуют применения новых управленческих технологий и теорий. На рисунке 5 изображен плакат с краткой информацией о системе 5S.

Как правильно организовать рабочее место



Рисунок 5 – Плакат с основными принципами системы 5S

Визуализация

Немаловажным принципом бережливого производства является визуализация информации в наглядной форме (дашборды, графики, диаграммы, схемы, таблицы и т.д.) и размещение ее непосредственно в производственных цехах, кабинетах сотрудников, что позволяет всем участникам производственного процесса быть в курсе текущего состояния и в режиме реального времени принимать правильные решения. Визуализация является визитной карточкой бережливого производства, его самой узнаваемой чертой.



Рисунок 6 – Пример визуализации производственного участка

Задачами метода визуализации [20] «являются:

- 1) наглядное представление информации для анализа текущего состояния производственных процессов;
- 2) обеспечение требуемого уровня безопасности;
- 3) создание условий для принятия обоснованных и оперативных решений;
- 4) создание условий для быстрого реагирования на проблемы;
- 5) быстрый поиск и обнаружение отклонений при выполнении операций или процессов производства продукции».

В Бережливом производстве «Визуализация» является одним из базовых принципов, визуализации подлежат:

1. Последовательность процессов или операций. Примеры: Карты потоков создания ценности, Схема стандартизированной работы, «Плавательные дорожки» (Swimlane) и др.

2. Потери в процессах. Пример: Карты потоков создания ценности, Диаграммы Спагетти и др.
3. Параметры процесса. Пример: Карта Шухарта.
4. Задания. Пример: Карточки заданий.
5. Зоны и места. Пример: Разметка.
6. Маршруты движения. Пример: Элементы визуальной навигации на территории предприятия или цеха.
7. Проблемы. Пример: Доска Андон.
8. Причины проблем. Примеры: Дерево причин (5 почему). Диаграмма Исикавы.
9. Результаты процессов (операций, заданий) и тренды. Пример: Доска производственного анализа.
10. Уровни запасов. Пример: Пространственные ограничители.
11. Потребности в деталях и материалах. Пример: Карточка Канбан.
12. Параметры оборудования. Пример: Цветная шкала прибора с разбивкой на секторы.
13. Уровни компетенций сотрудников. Пример: Гистограмма профиля компетенций.
14. Риски. Пример: Матрица рисков.
15. И так далее.

Канбан

Самым известным инструментом бережливого производства является Канбан (kanban, система канбан) — это метод управления бережливymi производственными линиями (японское слово, обозначающее «сигнал» или «карточка»), использующий информационные карточки для передачи заказа на изготовление с последующего процесса на предыдущий. Это простое изобретение определило будущее развития производственных систем во всем мире на многие десятилетия вперед. Применяется в Производственной

Системе Toyota для организации вытягивания путем информирования предыдущей производственной стадии о том, что надо начинать работу. Следующий процесс *«вытягивает»* необходимые детали/материалы с предыдущего, и так по всей цепочке производства вплоть до выпуска готового изделия. Отсюда название *«вытягивающая система»*. Вытягивающая система противопоставляется *«выталкивающей системе»*, при которой производственные участки производят полуфабрикаты *независимо* от того, сможет ли их обработать следующий этап производства, иначе говоря системе *без обратной связи*.

Представим себе крупное производственное предприятие, которое производит сложнейшие изделия, состоящие из тысяч отдельных деталей. Для того, чтобы выпустить готовое изделие, нужно также поставить и произвести все входящие в него детали к определенному моменту времени, для чего необходимо спланировать работу всех цехов и участков, для выполнения общего плана. Именно такой принцип заложен во все системы планирования производства. В результате чего, каждый производственный участок получает план, в котором явно указано какие детали нужно производить в каком порядке. В идеальном случае, если все пошло «по плану», общий план будет также выполнен в полном объеме. Однако в реальности в любом процессе всегда есть отклонения. Многочисленные исследования реальных производств показали, что производство без обратной связи порождает постоянно увеличивающиеся запасы незавершенного производства и постоянно увеличивающийся цикл производства продукции при растущих затратах на производство.

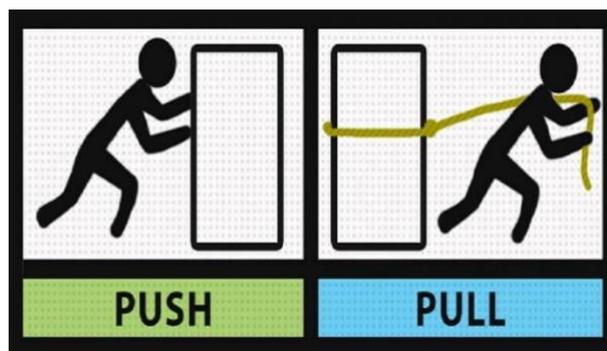


Рисунок 7 – Противопоставление вытягивающей и выталкивающей системы

Канбан является составной частью системы производства «точно-во-время», которая предполагает синхронную поставку *необходимого* в производстве материала: поступление непосредственно в производство на рабочее место к необходимому времени, в необходимом количестве, с предписанным качеством и в соответствующей потреблению упаковке. Система канбан начала свой путь в 1950-х годах на производственных линиях корпорации Toyota. Карточки крепились к таре с деталями. На таких бирках указывалась информация о номере и количестве деталей, какой отдел их отправляет и куда они должны прибыть. Работник, который непосредственно занимался монтажом и сборкой машин забирал детали из тары, на которой был прикреплен «канбан» с запросом для склада. Карточка вместе с пустым ящиком передавалась транспортировщиком на склад. Там другой работник уже подготовил новую тару с запчастями, на которой крепился производственный «канбан» — бирка с информацией о произведенных запчастях.

Производственный «канбан» заменялся на «канбан» с запросом для склада и отправлялся на производственную линию запчастей. Поэтому производилось именно то количество деталей, которое указывалось в карточке. Тара с новыми запчастями относилась транспортировщиком на монтажную линию.

Президентом корпорацию Toyota Motor Corporation Тайити Оно предложены следующие правила эффективного применения карточек канбан:

1. Каждый последующий рабочий процесс изымает *строго* указанное карточкой канбан количество деталей от предшествующего рабочего процесса.
2. Расположенный впереди рабочий процесс производит детали в количестве в соответствии с указанной карточкой от своего потребителя.
3. **Ни одна деталь** не должна быть произведена без карточки. Этим самым обеспечивается сокращение перепроизводства и избыточные перемещения товаров. Находящееся в обороте *количество карточек канбан представляет собой максимальный объем запасов.*
4. Канбан должен быть всегда прикреплен к деталям.
5. Дефектные детали не передаются дальше в последующий рабочий процесс.
6. Уменьшение количества карточек повышает их чувствительность. Они вскрывают существующие проблемы и делают возможным контроль запасов.

При применении карточек канбан должна быть гарантирована обзорность и безопасность системы. Карточки не должны теряться, и не должны смешиваться. Так как часто на рабочем месте применяются несколько различных карточек, имеет смысл внедрения доски канбан, на которой собираются карточки. Эта доска становится для производственного участка планом производства, который наглядно показывает какие именно детали востребованы на следующих этапах производства.

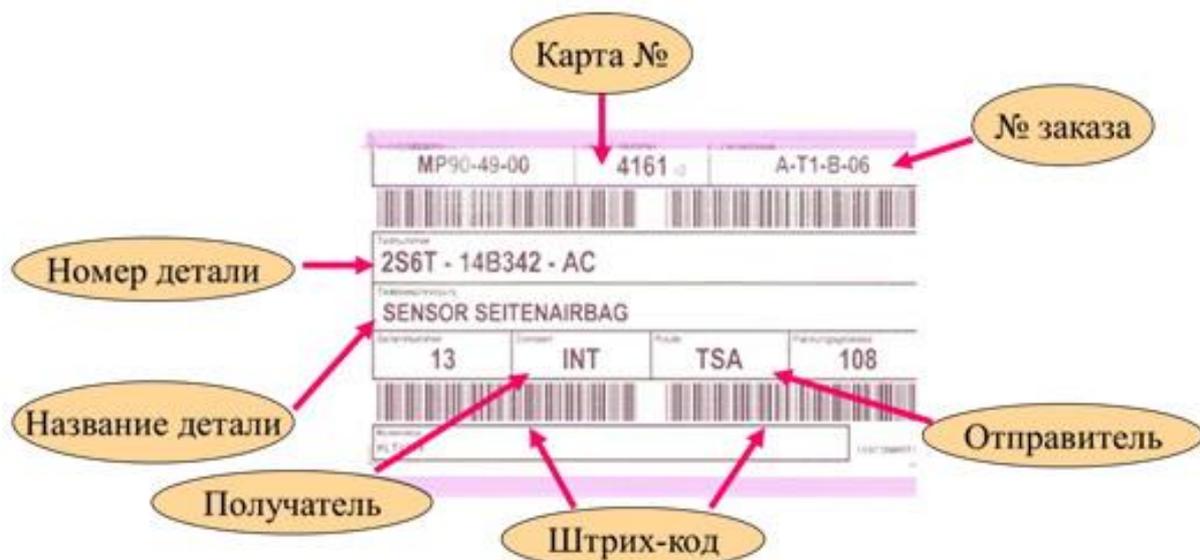


Рисунок 8 – Пример карточки канбан

Корпорация Toyota отказалась от сложных систем планирования производства, в пользу составления одного плана выпуска автомобилей, определяющего очередность выпуска автомобилей с главного конвейера. Все остальные производственные подразделения и даже поставщики работают без заранее установленного плана производства, производя ровно те детали и в том количестве, которые указаны в поступивших карточках канбан.



Рисунок 9 –оборот карточек канбан

Всеобщий уход за оборудованием ТРМ

Работы многих исследователей посвящены концепции всеобщего ухода за оборудованием (ТРМ) [22, 33], нацеленной на повышение эффективности технического обслуживания. Метод создан для обеспечения непрерывного улучшения процессов технического обслуживания в режиме «ноль потерь».

Процессы технического обслуживания и ремонта оборудования рассматриваются как комплекс эксплуатации и технического ухода при постоянном участии инженерных служб в подготовке графиков обслуживания оборудования, планово-предупредительных ремонтов и точном учете состояния оборудования для минимизации случаев отказа оборудования. Данный инструмент крайне важен при организации производства, работающего с ограниченным уровнем запаса по принципу «точно вовремя», так как минимизация уровня запасов в производственной системе приведет к потерям времени при отказе оборудования, которое невозможно будет компенсировать ввиду того, что потеря времени будет передаваться по цепочке вплоть до выпуска готовой продукции.

Целью выстраивания процесса всеобщего обслуживания оборудования является работа и минимизация хронических потерь [20]:

- Отказы и поломки в работе оборудования;
- Высокое время переналадки оборудования;
- Времени работы оборудования вне производственных операций;
- Технологические остановки;
- Снижение производительности оборудования;
- Брак продукции, обусловленный состоянием оборудования;
- Потери при наладке и подготовительных операциях.

В источниках [22, 33] также сформулированы «восемь принципов ТРМ:

1. Непрерывное улучшение: нацеленное на практику предотвращение 7 видов потерь.
2. Автономное содержание в исправности: оператор оборудования должен самостоятельно проводить осмотр, работы по чистке, смазочные работы, а также незначительные работы по техническому обслуживанию.
3. Планирование технического обслуживания: обеспечение 100%-й готовности оборудования, а также проведение мероприятий кайдзен в области технического обслуживания.
4. Тренировка и образование: сотрудники должны быть обучены в соответствии с требованиями по улучшению квалификации для эксплуатации и технического ухода за оборудованием.
5. Контроль запуска: реализовать вертикальную кривую запуска новой продукции и оборудования.
6. Менеджмент качества: реализация цели "нулевые дефекты в качестве" в изделиях и оборудовании.
7. TPM в административных областях: потери и расточительство устраняются в непрямых производственных подразделениях.
8. Безопасность труда, окружающая среда и здравоохранение: требование преобразование аварий на предприятии в ноль».

В завершении данного раздела следует отметить одну важную особенность бережливого производства: когда у производственного участка нет активных карточек канбан – производственный участок **обязан** остановить производство. В классическом производственном менеджменте такое требование вызывает возмущение само по себе, ведь в классическом производстве столько незавершённой продукции, что работы хватит на год вперед – ни секунды простоя быть не должно. В бережливом производстве, вынужденные остановки производства используют для того, чтобы выполнять мероприятия TPM: самостоятельный осмотр, работы по чистке,

смазочные работы, работы по техническому обслуживанию, выполнение мероприятий кайдзен в области технического обслуживания.

Быстрая переналадка (SMED)

Быстрая переналадка (Single-Minute Exchange of Dies (SMED) — быстрая смена пресс-форм) является одним из важнейших методов Бережливого производства. Метод направлен на сокращение потерь при переналадке и переоснастке оборудования.

Как уже было сказано выше, выравнивание производственного потока является одним из главных инструментов производственной системы Тойота, и именно методы быстрой переналадки играют ключевую роль в создании возможности производства деталей и изделий минимальными партиями. Работа производство крупными партиями приводит к созданию высокого уровня запасов, дополнительным расходам на их обработку (перемещение, транспортировку, учёт, эксплуатацию, содержание складов и т.п.) и заморозке оборотных средств.

В основе метода лежит простой метод деления наладки на две составляющие [22, 33]:

- Внутренняя наладка – часть операций процесса переналадки, которые выполняются при остановленном оборудовании, подлежащем наладке.
- Внешняя переналадка – часть операций процесса переналадки, которые выполняются во время изготовления годных изделий на оборудовании, подлежащем наладке.

В действующем производстве процесс переналадки редко рассматривается под таким углом и различия между внутренней и внешней наладками отсутствует, производственный персонал уверен в том, что время наладки сократить невозможно и поэтому попыток сделать это не предпринимается. В работе [33] сформулированы «шаги применения инструмента быстрой переналадки:

1. Изучение текущей ситуации. Проводится хронометраж всего процесса переналадки (с момента завершения производства изделия «А» до начала изготовления изделия «В»), регистрируются все действия в мельчайших подробностях (взял, закрепил, перешёл и т.п.). Рекомендуется снимать текущий процесс переналадки на видео для удобства проведения последующего анализа.
2. Разделение внутренних и внешних работ. На этом шаге производится анализ: все зафиксированные действия классифицируются на внутренние и внешние, а также на те, которые нужно обязательно сделать до остановки оборудования, во время остановки и после неё.
3. Перевод внутренних работ во внешние. Продолжается анализ, выделяются те действия, которые можно выполнить без остановки оборудования (предварительная сборка, корректировка, разогрев, подготовка инструмента, оснастки и т.п.)
4. Сокращение внутренних работ. Выработка решений, позволяющих ликвидировать корректировки, настройки, выполнение упрощённых фиксаций, организация параллельного выполнения работ и т.п. На этом шаге может потребоваться изменение конструкции оснастки и приспособлений, что может потребовать значительных вложений средств.
5. Сокращение внешних работ. Выработка решений по улучшению логистики (подвоза оснастки, приспособлений, инструмента и т.п.), улучшению обслуживания, сокращению передвижений и т.п.»

Практика показывает, что использование данной методики позволяет снизить время переналадки даже без капитальных вложений в усовершенствования оборудования и создания специальной оснастки.

После достижения практических результатов на предприятии должны быть разработаны стандарты выполнения работ при переналадке в котором фиксируются основные параметры переналадок (порядок выполнения операций, параметры настройки и запуска, время, инструмент и оснастка).



Рисунок 10 – Шаги быстрой переналадки

Автономизация

Для дополнительного улучшения производственного процесса предложен принцип автономизации оборудования [20]: «Дзидока (автономизация) – принцип работы производственного оборудования, которое способно самостоятельно обнаружить проблемы, например, неисправность оборудования, дефекты в качестве продукции или задержки в выполнении работы, сразу остановиться и сигнализировать о необходимости оказания помощи». Данный подход позволяет снизить перепроизводство и не допустить производства дефектной продукции. Таким образом оборудование оснащается простейшими

интеллектуальными элементами способными самостоятельно влиять на процесс производства в определенных ситуациях.

Пока-ёкэ

Для предотвращения дефектов и ошибок, вызванных человеческим фактором, используют принцип Рока-уоке (Принцип нулевой ошибки, англ. Zero defects). Метод основан на изучении причин дефектов и поиска способов не допустить появление дефектов в будущем. Используются три способа защиты от ошибок:

1. Обнаружение несоответствующих деталей;
2. Невозможность обработки дефектных деталей;
3. Конструкционная защита детали не позволяющая установить деталь неверным способом.

Поток единичных изделий

Бережливое производство способно обеспечивать непрерывный поток, но только при условии значительного сокращения времени переналадки оборудования. Это дает возможность сделать немного одних деталей, переналадить станок, сделать еще немного других деталей и так далее. То есть детали могут (и должны) изготавливаться только тогда, когда этого требует следующая производственная стадия. Методология ЛТ не работает, если ниже по течению потока не производится выравнивание графика производства дневных колебаний числа выполняемых заданий, не связанных с реальным изменением спроса. Если такого сглаживания не делать, выше по потоку везде возникнут узкие места, а затем для их компенсации будут созданы буферные (резервные) запасы.

Для того чтобы на производстве, выпускающем много различных моделей, перейти на метод потока единичных изделий, надо, чтобы каждый механизм и станок мог практически мгновенно перестраиваться с производства детали одной модели на деталь другой. Важно также, чтобы размеры некоторых прежде громоздких машин, например покрасочных

камер, стали "правильными" и хорошо вписывались в компоновку производственной линии. Зачастую это означает, что лучше пользоваться простыми, менее автоматизированными и менее скоростными машинами (но при этом более точными и воспроизводимыми).

Люди, составляющие производственные команды, должны быть профессионалами в нескольких областях (на случай, если кто-то отсутствует или занимается другой работой), оборудование должно всегда поддерживаться в полностью работоспособном состоянии. Вся работа должна быть четко стандартизирована. Рабочие должны быть обучены тому (а машины - настроены на то), как наблюдать за машинами и контролировать их работу. В помощь этому разработаны методы «пока-ёкэ».

Эти методы следует применять совместно с множеством других методов визуального контроля: от методов 5S, направленных на обеспечение порядка в рабочей зоне, до индикаторов состояния процесса (часто в форме досок "андон"), от удобно расположенных, постоянно обновляемых стандартных блок-схем процессов до экранов с ключевыми измеримыми характеристиками процесса и с финансовой информацией о его затратах. Хотя конкретный набор методов может отличаться от описанного нами, ключевые принципы, для которых они предназначены, меняться не должны. Каждый участник процесса должен видеть все, что происходит, должен понимать все аспекты процесса и иметь возможность оценить его состояние в каждый момент времени.

В 1960-х годах Toyota установила действительно революционное достижение, значительно снизив объемы партий и увеличив скорость переналадки станков. Переналадка любого оборудования, ведущая к потере производственного времени, рассматривается как машина, которая не успевает работать в ритме всего производственного процесса [31].

Следует отметить, что сфера применения бережливого производства, в первую очередь, это массовое крупносерийное производство. Для

динамичных, мелкосерийных и производств «под заказ» выделить равномерные потоки в производстве крайне затруднительно. При этом отдельные инструменты, такие как быстрая переналадка, всеобщий уход за оборудованием, автономизация, пока-ёкэ и другие, являются универсально полезными для любых типов и видов производства.

1.5.2. Теория ограничений в управлении производством

Важной концепцией для построения эффективных производственных систем является теория ограничений предложенная Элией Голдраттом [23]. В своих трудах автор последовательно описывает методы повышения эффективности деятельности компании (не только производственных, но в первую очередь производственных), основанных на выявлении узких мест и ограничений.

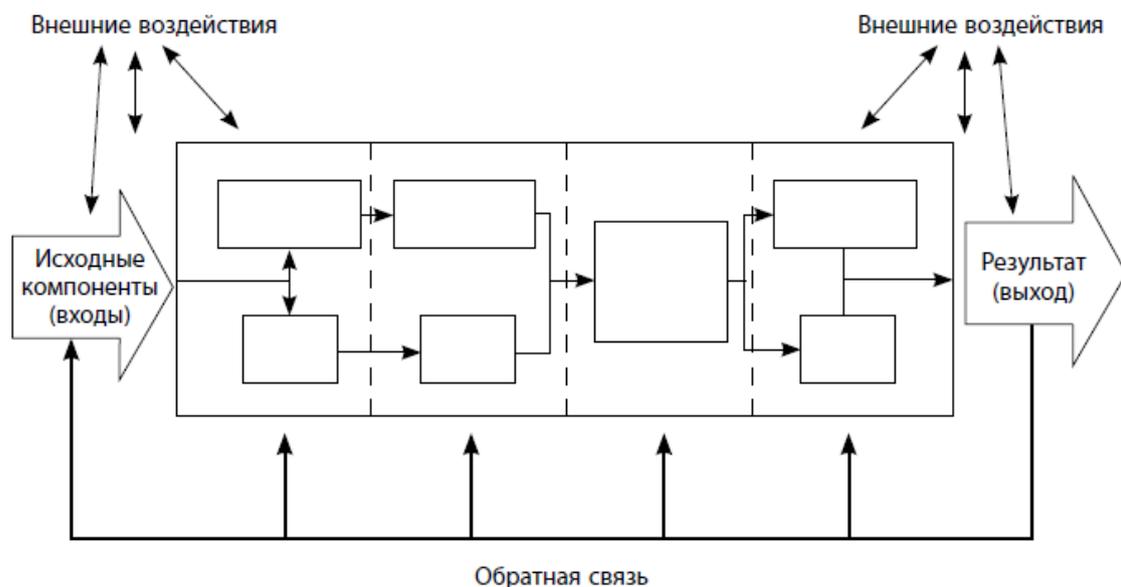


Рисунок 11 – Пример производственной системы

Если говорить об искусственных системах (например, производственное предприятие), то у такой системы всегда есть цель, ради которой она была создана [26]. В частности, для производственных предприятий такую цель можно сформулировать так: производить и реализовывать востребованную рынком продукцию с целью извлечения прибыли. Дополнительно могут

быть сформулированы критерии достижения цели: максимальная прибыль, максимальная выручка, минимизация оборачиваемости денежных средств и так далее. В теории ограничений системы рассматриваются подобными цепям или совокупностям физических цепей [25]. Ключевым тезисом теории является утверждение, что в системе *в каждый момент времени* есть только одно ограничение («узкое место», «слабое звено») – оно определяет продуктивность всей системы, т.е. точку, когда цепь будет разорвана [26]. Поэтому основной задачей является поиск «узкого места» цепи (рисунок 12).

Вторым важным тезисом данной теории является то, что для повышения продуктивности всей системы достаточно лишь увеличить продуктивность ограничения («расшить узкое место», «укрепить слабое звено»), таким образом можно решить проблему, до момента выявления нового «узкого места», которое после устранения предыдущего заняло его место [26].

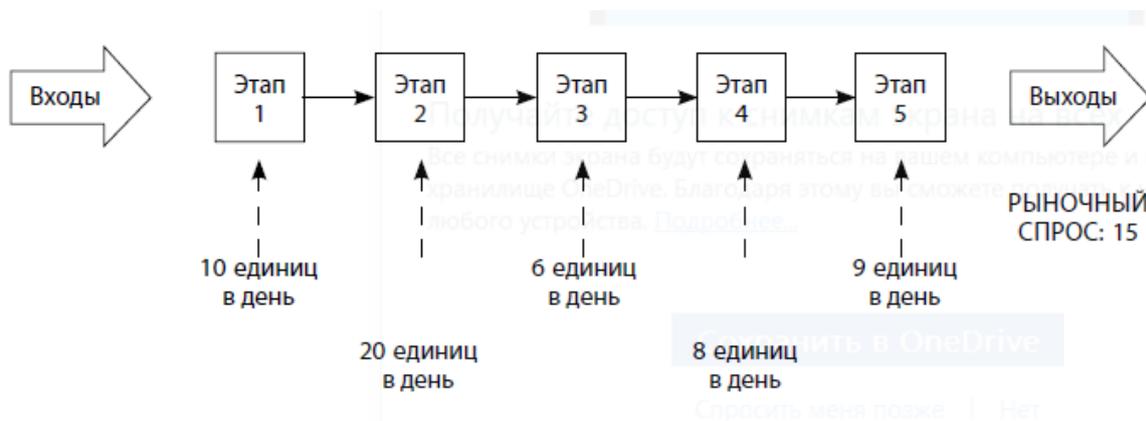


Рисунок 12 – Выявление узкого места в цепи

Реальные производственные предприятия имеют множество цепей создания ценностей, обусловленных разными технологическими процессами производства различных видов продукции, разными сроками поставок материалов и комплектующих, различными рынках сбыта и т.д. Цепи создания ценностей имеют взаимозависимости, а внешняя среда является изменчивой. Таким образом верность утверждения, что

производительность системы не может быть больше производительности узкого места не приводит к верности обратного утверждения: даже если все элементы цепи имеют максимальную производительность – это не гарантирует той же производительности системе в целом [34].

В основе теории ограничений лежит системный подход к работе с узкими местами, который состоит из последовательного построения аналитических схем следующих типов [26]:

- Дерево текущей реальности для выявления причинно-следственных отношений между нежелательными явлениями и корневой причиной большинства данных нежелательных явлений.
- Диаграмма разрешения конфликта (ДРК) — для устранения противоречий в системе, которые часто являются причиной нежелательной ситуации в системе. Способ устранения противоречий принято называть инъекцией.
- Дерево будущей реальности (ДБР) — когда выбраны некоторые способы (инъекции) устранения выявленных с помощью ДТР корневых причин проблем или конфликта в диаграмме разрешения конфликта, строится дерево, показывающее будущее состояние системы. Это необходимо для выявления негативных последствий выбранных инъекций (негативных ветвей) и выбора способов борьбы с ними.
- Дерево перехода — для выявления возможных препятствий на пути преобразований и их устранения.
- План преобразований — для выработки конкретных инструкций для исполнителей для внедрения планируемых изменений.

Алгоритм работы с узкими местами

Общий алгоритм осуществления изменений в системе:

1. Найти узкое место. Узкое место можно определить как прямым наблюдением за деятельностью цепи, так и по косвенному признаку. Для

узких мест характерно наличие длительной очереди ожидания на входе (детали, которые необходимо обработать или же заказы клиентов, ожидающих ценового предложения – природа узкого места может быть любой).

2. Ослабить влияние узкого места на производительность системы. Обеспечить максимальную пропускную способность узкого места, исключить простои в работе, устранить мешающие факторы.

3. Обеспечить максимальную производительность узкого места и проанализировать результат.

4. Расшить узкое место. Если после оптимизации узкое место по-прежнему ограничивает производительность системы – необходимо снять ограничение, в противном случае можно пропустить данный шаг. Для устранения узкого места возможно потребуются покупка новых единиц оборудования или реконструкции существующего, разработка новой технологии обработки изделий. Все это связано с существенными инвестиционными затратами. Необходимо быть абсолютно уверенным, что все возможные организационные мероприятия, способные повлиять на узкое место уже выполнены.

5. После снятия ограничения системы необходимо проанализировать результат, оценить изменения производительности системы и вернуться на первый шаг.

Данный алгоритм позволяет итерационно оптимизировать пропускную способность цепи, постоянно увеличивая эффективность ее работы.

Буфер-барабан-веревка

Важным методов теории ограничений является метод «барабан – буфер – верёвка» [26]. Данный метод предназначен для того, чтобы максимизировать производительность системы в условиях наличия в системе ограничения. При этом используются следующие понятия:

– «Барабан» – ритм или такт работы системы, он выбирается равным максимальному количеству ритму работы узкого места. Например, если узкое место может обрабатывать 10 единиц продукции в час, то и барабаном всей системы должен будет стать 10 единиц продукции в час.

– «Буфер» – с целью минимизации рисков простоя узкого места по причине недопоставок входных материалов (полуфабрикатов) перед ограничением должен быть создан некоторый буфер запасов, защищающий ограничение от простоев. Размер данного буфера определяется исходя из вероятности возникновения отклонений на предшествующих этапах обработки и времени устранения отклонений. Например, перед узким местом работает некоторое оборудование. Среднее время ремонта оборудования составляет один день. Для того, чтобы обезопасить узкое место от простоя, необходимо создать запас ровно на один день. При круглосуточной работе узкого места и Барабане равном 10 изделий в час Буфер будет составлять 240 единиц полуфабрикатов;

– «Верёвка» – ограничение, выставляемое на вход системы (запуск производства). Материалы должны передаваться в производство только тогда, когда буфер наполнен не полностью. При нормальной работе системы Веревка будет ограничивать запуск производства в соответствии с Барабаном, т.е., например, 10 единиц продукции в час. При этом в случае вынужденного простоя на этапе запуска, после устранения причины простоя, продукция будет запускаться до тех пор, пока буфер не будет наполнен полностью.

Предложенный метод помогает оптимизировать работу даже очень сложных систем с минимальными усилиями и изменениями, вносимыми в систему. Именно поэтому данный метод является незаменимым для систем и производств, где можно выявить стабильные потоки (материальные, информационные) [35, 36].

Однако достаточно сложно применять данный подход для мелкосерийных предприятий, портфель заказов которых находится в постоянной динамике, узкие места постоянно меняются [37]. Для таких производств хорошо подходит следующий набор практик – быстореагирующее производство.

1.5.3. Быстореагирующее производство (QRM)

В течение последних 10 лет набирает популярность концепция «Быстореагирующее производство» (Quick Response Manufacturing, QRM), данная концепция развивает принципы бережливого производства и теории ограничений, фокусируясь на временном показателе, рассчитываемому по специальной методике учета всех временных затрат, необходимых для отгрузки заказа клиента при полном отсутствии всех видов материальных запасов, но с учетом всего времени пролеживания, которое обычно возникает при движении материального потока через производственную систему.

Выделяются четыре ключевые концепции, которые составляют стратегию QRM [27]:

- *Сила времени.* Описывает зависимости себестоимости продукции и ее качества от полного времени обработки заказа.

- *Организационная структура.* Содержит перечень практических рекомендаций по построению оптимальной организационной структуры компании и распределения ответственности, позволяющей сократить полное время выполнения заказа и как следствие повысить эффективность компании в целом.

- *Системная динамика.* Набор принципов, описывающий влияние взаимодействия машин, людей и продукции на полное время выполнения заказа. Содержит набор практических рекомендаций по организации процесса планирования.

- *Применение в масштабе всего предприятия.* Содержит ряд практических рекомендаций по внедрению инструментов QRM по всей цепочке создания ценности, а не на отдельных участках.

Автор теории определяет цель QRM следующим образом [27] «сократить время выполнения заказа за счет всех операций компании, как внутренних, так и внешних». Важнейшим тезисом QRM является принятие факта о том, что предприятие существует в условиях постоянного изменения внешних условий. Бережливое производство фокусируется на устранении любой изменчивости в производственной системе [27] однако способность предприятия в условиях изменчивого спроса на продукцию является конкурентным преимуществом. В условиях, когда изменчивый спрос становится актуальным для широкого спектра компаний наравне с инструментами выравнивания производственных потоков необходимо также развитие возможности работы производственной системы в условиях внешних изменений.

Критический путь производства

В концепции QRM вводится ключевой показатель эффективности компании, который используется в качестве основной метрики производства – критический путь производства или же «полное время заказа». Критический путь производства – календарное время, отсчет которого начинается с момента, когда заказчик делает заказ, проходящий по критическому пути, и заканчивается тогда, когда первое изделие из этого заказа поставлено заказчику. При этом считается, что выполнение заказа осуществляется без использования материальных запасов (все материалы заказываются у поставщиков в момент передачи заказа в производства), но учитывается среднее время пролеживания и транспортировки запасов (пример критического пути производства представлен на рисунке 13).



Рисунок 13 – Расчёт полного времени заказа

Системная работа по снижению полного времени заказа позволяет существенно повысить эффективность компании в целом:

- Снизить дополнительные затраты, которые несет компании при выполнении срочных заказов: сверхсрочные, срочный заказ материалов, пени и прочее.
- Снизить количество производственных совещаний по балансировке планов производства.
- Снизить операционные затраты, необходимые для поддержания системы планирования с большим горизонтом поставок.
- Сократить затраты на хранение материалов, комплектующих, незавершенного производства и освободить складские площади.
- Снизить объемы неликвидной продукции, произведенной для обеспечения спроса.
- Сократить количество отмененных в следствии длительных сроков поставки заказов.

Концепция QRM предлагает изменить организационную структуру компании в виде самодостаточных «ячеек», полностью отвечающих за определенный участок работ на критическом пути поставки. Ячейки должны быть обеспечены необходимыми ресурсами и им должен быть предоставлен необходимый уровень свободы для постоянной минимизации времени выполнения заказа. Ячейки создаются вокруг сфокусированного целевого рыночного сегмента (вид продукции имеющий отдельный канал

продаж и независимый от других товаров спрос). По определению автора [27] «ячейка – это набор независимых (отделенных от остальной компании), сочетаемых друг с другом многофункциональных ресурсов, способных выполнить последовательность операций для всех работ, относимых к конкретному FTMS. Набор ресурсов включает команду многофункциональных работников, полностью распоряжающихся всеми операциями ячейки (нет начальника отдела)».

В работе [27] также приводится доказательство тезиса, что производство должно обладать достаточным резервом мощностей для минимизации последствий всех видов отклонений. Чем выше средний процент загрузки мощностей на производстве, тем выше такт потока – среднее время, необходимое ресурсу, чтобы завершить текущую работу и обработать одно изделие, которое не было включено в изначальный план. Автор последовательно аргументирует точку зрения, что планирование производства с загрузкой более 85% максимизирует риск невыполнения плана производства. По мнению автора именно 85% загрузки мощностей является оптимальным значением для работы производства в условиях постоянных изменений.

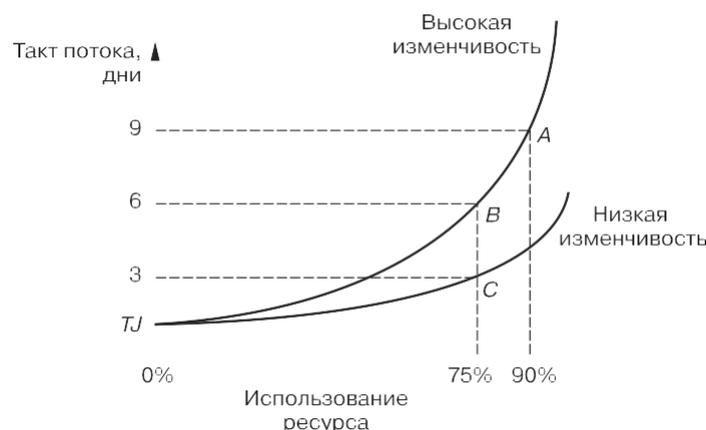


Рисунок 14 – Суммарный эффект использования ресурса и уменьшения изменчивости, влияющий на такт потока работы

Концепция QRM интересна также тем, что в ней кроме практических действий по изменению организационной структуры проработан вопрос

изменения системы планирования производства продаж и закупок, необходимых для поддержки концепции при ее использовании, а также предложен особый режим работы автоматизированной системы планирования (ERP) при котором без серьезных изменений ERP сможет эффективно поддерживать процессы на предприятии оптимизированном с использованием принципов QRM.

Автор отмечает, что алгоритмы планирования ERP рассчитывают загрузку ресурсов путем простого сложения длительности всех операций, выполняемых на оборудовании, без учета времени поступления деталей и среднего времени ожидания в очереди. Для исправления недостатка в механизмах планирования ERP автор предлагает использовать инструмент POLCA (накладывающиеся друг на друга циклы взаимодействия попарно соединенных ячеек при помощи карточек и авторизации) (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization), который координирует потоки между ячейками для обеспечения даты сдачи. Автор предлагает полностью отказаться от пооперационного планирования, ограничившись планированием с точностью до ячейки (аналог планирования цехоходов, распространённый метод планирования на машиностроительных предприятиях СССР).

Для ограничения уровня незавершенного производства и исключения производства невостребованной продукции вместо Канбан используется карточка POLCA. В то время как Канбан – это задание на пополнение запаса POLCA – сигнализирует о свободной мощности не детализируя наименование детали. Такой принцип позволяет создать систему с обратными связями, исключаящую производство продукции, не востребованной в участках потребителей. При поступлении двух партий на обработку в ячейке первой будет взята в работу та, у которой дата начала обработки согласно плану ERP раньше, однако устанавливается запрет на начало обработки партий, у которых дата начала обработки, рассчитанная

ERP, находится в будущем. Это свойство системы позволяет создать резерв мощностей для обработки партий изделий, которые по какой-либо причине «опаздывают» и могут быть доставлены в любую минуту.

Сочетание всех вышеперечисленных принципов позволяет компаниям, выпускающим сложную продукцию мелкими сериями значительно увеличить эффективность работы, повысить капитализацию и снизить все виды издержек, оставаясь при этом максимально конкурентоспособными.

1.5.4. Сетецентрическое производство

Обычно управление производственной системой осуществляется централизованно, например исполнительным директором и его заместителями. При этом все важнейшие решения, связанные с планированием, организацией и контролем работы подразделений предприятия, перечисленных выше, принимаются вне этих подразделений и далеко не всегда являются наиболее эффективными и результативными с точки зрения выполнения ГКПП. В связи с этим актуальной является задача поиска децентрализованных методов управления производственными системами, которые способны повысить эффективность и результативность выполнения ГКПП. Такая задача может быть решена на основе сетецентрического подхода, предусматривающего формирование самоорганизующихся распределенных систем группового управления [38, 39].

Под сетецентрическим управлением понимается децентрализованное групповое управление предприятием. Под группой понимается совокупность подразделений предприятия, которые совместными усилиями должны решить некоторую ситуационную задачу, возникающую в процессе производства.

Сетецентрическое управление предполагает большее делегирование полномочий нижним элементам организационной структуры предприятия,

предоставление им всей информационной картины, свободу принимать собственные решения для достижения общих целей.

Производственная система при таком подходе разделяется на отдельные элементы, способные самостоятельно принимать решения по широкому кругу вопросов – подход похож на выделение ячеек QRM, но степень свободы может быть еще выше. По аналогии с QRM элементами являются не только производственные подразделения, но и отделы продаж, закупок и т.д. Степень свободы элементов в сетцентрической среде такова, что элементы могут принимать решения не только в рамках одной ячейки, но и вступать во взаимодействия с другими элементами системы, с целью достижения групповых целей, установленных на уровне компании.

Например, при выявлении отклонений в ходе реализации выполнения заказов клиентов или появлении срочных внеплановых заказов подразделения могут самостоятельно принимать решения о привлечении дополнительных ресурсов (сверхурочные работы, привлечение ресурсов на рынке аутсорсинга и т.д.) для производства дополнительных объемов продукции, либо договориться со снабженческими подразделениями о закупке недостающей продукции у других производителей, либо через сбытовые подразделения договориться о приемлемом для потребителей увеличении сроков выпуска продукции. Таким образом может быть найдено решение, позволяющее компании увеличить прибыль или же снизить потери от негативных сценариев работы.

При использовании децентрализованного управления производственной системой задачу по выполнению ГКПП подразделения должны решить самостоятельно. В этом случае можно говорить о самоорганизации подразделений, обладающих способностью к принятию самостоятельных решений, т.е. являющихся интеллектуальными элементами производственной системы.

Согласно [40] под самоорганизацией в производственной системе будем понимать процесс автономного формирования оптимальной структуры и оптимального алгоритма ее функционирования в соответствии с поставленной перед системой целью, описываемой некоторым критерием качества, при ограничениях, определяемых ресурсами предприятия и внешними условиями.

Для организации процесса принятия коллективного решения предлагается сформировать одну из трех организационных структур: комитет, иерархию и полиархию [41, 42], в рамках которых осуществляется комплексное оценивание каждого из возможных вариантов и выбор наилучшего, удовлетворяющего требованиям всех подразделений промышленного предприятия на основе выбранной модели принятия коллективного решения.

Несмотря на то, что предоставление широкой степени свободы в принятии решений отдельным подразделениям может показаться достаточно радикальной идеей – в реальной деятельности крупные компании достаточно часто используют сетцентрический принцип организации при решении самых разных вопросов.

1.6. Автоматизированные системы управления производством

Управление производственными системами, как частным случаем социально-технических систем [43], связано со значительными сложностями, вызванными неполнотой информации, конфликтами интересов и целей, быстрыми и многочисленными изменениями в окружающей среде промышленного предприятия. Кроме того, резко возрастают требования к гибкости производства и к оперативности принятия управленческих решений, что, в свою очередь, обуславливает необходимость автоматизации и информатизации процессов управления, что в конечном счете ведет к концепции построения автоматизированной

системы управления, как основного механизма системы управления производственного предприятия.

Рассмотрим основные определения, связанные с понятием «автоматизированная система управления». Ниже приведены одни из возможных определений основных понятий, наиболее подходящие, по мнению авторов, под контекст рассматриваемой проблемы.

Система управления — систематизированный набор средств сбора сведений о подконтрольном объекте и средств воздействия на его поведение, предназначенный для достижения определённых целей. Объектом системы управления могут быть как технические объекты, так и люди [44]. В случае, если в качестве объекта управления выступает производственное предприятие как организационная структура, будем говорить о системе управления производственным предприятием.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ (АСУ) (automated, automatized control system (ACS), computerized control system, management information system (MIS)) — система управления, в которой применяются современные электронные средства обработки данных и экономико-математические методы для решения основных задач управления производственно-хозяйственной деятельностью. Это человеко-машинная система, в ней ряд операций и действий передается для исполнения машинам и другим устройствам (особенно это относится к т.н. рутинным, повторяющимся, стандартным операциям и расчетам), но главное решение всегда остается за человеком. Этим АСУ отличаются от автоматических систем, т.е. таких технических устройств, которые действуют самостоятельно по установленной для них программе, без вмешательства человека [45].

С развитием компьютерной техники и с увеличением сложности производственных процессов развитие получили автоматизированные системы управления, специализирующиеся на различных уровнях

управления предприятия [46, 47, 48, 49]. Ниже приведены основные виды автоматизированных систем управления производством актуальные на сегодняшний день:

1. ERP-системы (англ. Enterprise Resource Planning, планирование ресурсов предприятия) [47] — 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. Понятие ERP предложено в качестве развития стандарта MRP II. Системы данного класса охватывают стратегический и тактический уровни управления, объединяя все процессы предприятия в единую систему.
2. APS-системы (Advanced Planning & Scheduling) [50] – система асинхронного планирования производства, основанная на продвинутых алгоритмах планирования расписания с учетом выполнения всех производственных и логистических операций по всей цепи поставок с учетом всех видов ресурсов и прочих зависимостях. Полученное в результате детально расписание всех операций позволяет вносить изменения в план и пересчитывать его в режиме реального времени, для обеспечения постоянной актуальности плана операций по всей цепи поставок. Эта важная особенность позволяет системе выполнять перепланирование цепей поставок в режиме реального времени, реагируя на любые отклонения в выполнении планов. Данный класс программного обеспечения находится на стыке ERP и MES систем, обладая признаками той и другой. Многие существующие ERP-системы имеют встроенные APS модули.

3. MES (manufacturing execution system) [51, 52] – система управления производством уровня цеха. Данный класс информационных систем работает от тактического уровня до оперативного уровня управления, решая при этом широкий спектр задач.
4. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – класс систем, предназначенный для сбора в режиме реального времени данных с оборудования, а также обеспечения интеграционных потоков низкого уровня, сбора статистики, визуализации информации и хранения данных с оборудования. Данные системы относятся к оперативному уровню управления и с каждым годом все активнее применяются при построении комплексных систем управления предприятием.
5. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) – класс систем, используемый для автоматизации управления технологическими оборудованием при выполнении технологических операций на промышленных предприятиях.

Приведенные выше автоматизированные системы не взаимозаменяемые, каждая система имеет свою целевую область применения. При этом все системы имеют между собой функциональные пересечения, которые с одной стороны позволяют предприятиям минимизировать затраты на автоматизацию (отказавшись например от внедрения ERP-системы для среднего производственного предприятия), а с другой — построить комплекс взаимно-интегрированных систем (например, комплексную систему управления производством на базе ERP, MES и SCADA), где пересекающиеся функциональные области будут служить точками интеграции (например, месячный план выпуска продукции из ERP станет входной информацией для детального планирования в MES) и так далее.

1.6.1 История возникновения автоматизированных систем управления предприятием

Развитие автоматизированных систем управления предприятием началось в 1960-е годы, и на данный момент данный класс систем находится на пике своего развития. Постоянное усложнение процессов производства и требования повышения скорости процессов привели к необходимости снижения операционных затрат на выполнение различных вычислений, необходимых при ведении бухгалтерского учета, подготовки отчетности руководству, планировании и т.д. При ведении на бумаге данные типы задач требуют колоссального привлечения трудовых ресурсов для решения задач. Свое начало автоматизированные системы управления производством начали именно в виде систем автоматизированного планирования, так как при сложном производстве расчет плана производства предприятия даже на месяц может стать нерешаемой задачей. На современном этапе своего развития автоматизированные системы управления контролируют все аспекты деятельности предприятий являясь наиболее полным и достоверным источником структурированной информации о предприятии и его процессах.

Для того, чтобы понять особенности развития, необходимо рассмотреть последовательную эволюцию основных систем управления ресурсами предприятия [53], которые возникали по мере готовности человека к оперативной обработке все более увеличивающихся объемов информации. Основные этапы развития приведены на рисунке 15.

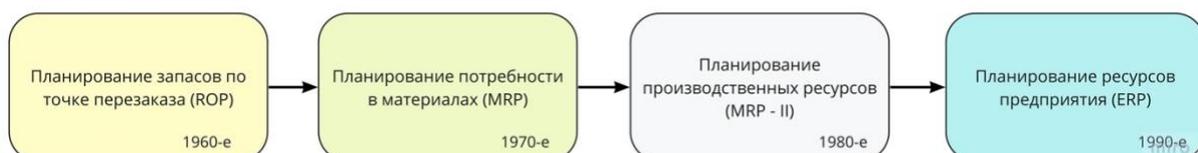


Рисунок 15 – Развитие систем планирования и контроля производства

1.6.2 Планирование запасов по точке перезаказа

Первой из автоматизированных систем планирования, получивших распространение, стала система планирования запасов по точке перезаказа.

Эволюция систем происходила в условиях изменяющейся экономической обстановки (в первую очередь в США). Ограничения, заложенные в концепцию систем, компенсировались тем, что экономическая ситуация была достаточно стабильна для того, чтобы системы могли работать, принося положительный эффект предприятиям, использовавшим системы.

В 60-е годы основным конкурентным преимуществом была стоимость (себестоимость), в результате которой была разработана целенаправленная производственная стратегия, основанная на крупносерийном производстве, минимизации издержек в стабильных экономических условиях. Новая для того времени компьютеризированная система планирования по точке перезаказа (Reorder Point - ROP) удовлетворяла базовые потребности по планированию производства этих фирм. Суть ROP сводится к измерению параметров, характеризующих состояние склада: текущий уровень запаса продукции и значение точки перезаказа для неё. Если значение точки перезаказа превышает текущий уровень запаса, запускается процедура пополнения продукции за счёт внутреннего производства или закупки у внешнего поставщика (рисунок 16).

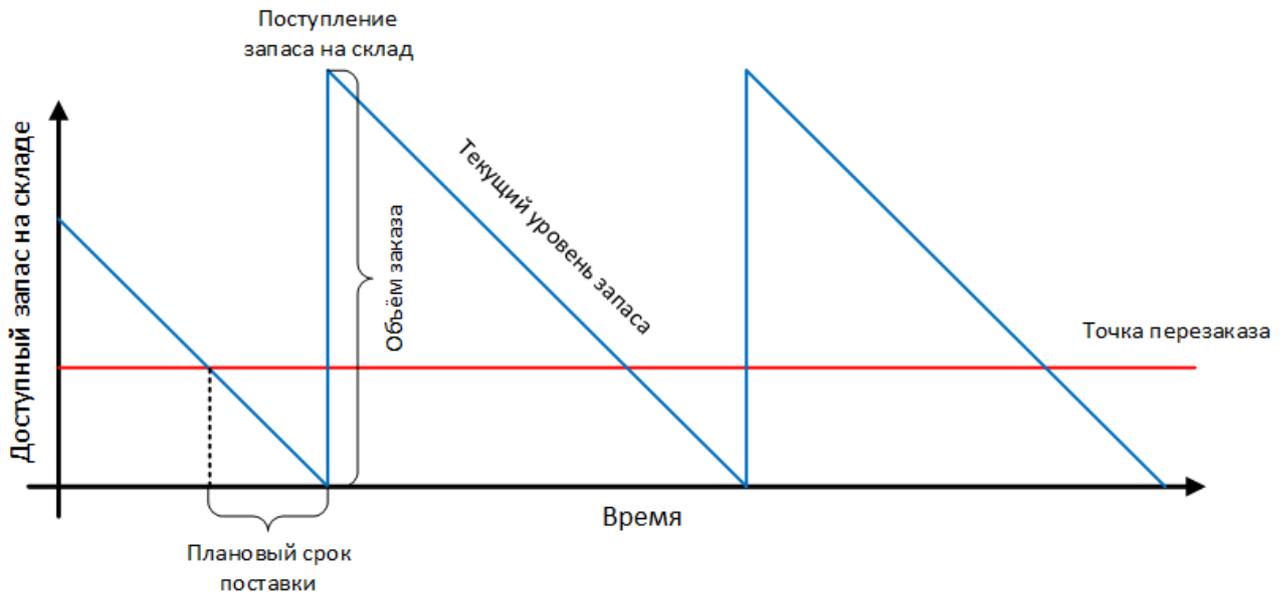


Рисунок 16 – Принципиальная схема планирования по точке заказа

Данная система основывается на сборе статистики, обработке и загрузке данных в систему следующих существенных параметров номенклатуры:

1. значение текущего запаса продукции на складе;
2. значение точки переказа для продукции;
3. время пополнения запаса (плановые сроки поставки);
4. объём заказа.

Ежедневно, чаще всего в ночные часы, на складе выполняется замер текущего уровня запаса продукции. Если значение запаса ниже точки переказа, запускается процедура пополнения, допустим, через закупку от поставщика или же заказ в производство.

В ходе закупки продукции её запас должен быть положительным до момента оприходования на склад. Таким образом, после наступления события переказа и фактическим пополнением складской запас должен быть не нулевым, во избежание дефицита продукции и остановки работы компании.

$$\text{ТочкаПереказа} = \text{ПотреблениеВДень} / \text{ПлановыеСрокиПоставки},$$

где ПотреблениеВДень характеризует объём потребляемой продукции за 1 день, ПлановыеСрокиПоставки – сроки поставки материалов от поставщика на склад в днях.

Такая простая стратегия позволила крупным производственным предприятиям исключить человеческий фактор в процессах обеспечения, оптимизировать уровень запасов (исключив из системы закупки «на всякий случай»), создать управляемые и прогнозируемые процессы обеспечения. Данная стратегия используется и до сих пор крупносерийными предприятиями, логистическими центрами и торговыми компаниями. Несмотря на очевидные недостатки и упрощения данной модели, она является основной для предприятий со стабильным спросом на продукцию.

1.6.3 Технология MRP

На следующем этапе развития предприятия начали автоматизировать процессы формирования, учета и отслеживания календарной потребности в готовой продукции (заказы клиентов, прогнозы продаж и т.д.) [54]. Следующим шагом стал анализ плана выпуска готовых изделий с целью определения календарной потребности в комплектующих изделиях, сырье и материалах, деталях и сборочных единицах с учетом наличного складского запаса. Эта задача была решена в компьютерном варианте в начале 60-х гг. и получила название MRP (Material Requirements Planning) – планирование потребности в материалах. Термин был введен в употребление Орлицки (Orlicky), который осознал потенциал применения вычислительной техники для решения задачи управления производственными запасами. Ранние компьютерные приложения MRP были построены на основе процессора спецификаций (Bill of Material Processor — BOMP), преобразовавшего дискретный план производства родительских номенклатурных позиций в дискретный план производства и закупки номенклатурных позиций-компонентов.

Основой системы стали данные о составе изделий и нормах расхода сырья, материалов и компонентов на единицу измерения готовой продукции. В теории MRP эта информация получила название ВОР (Bill of Material) (спецификация) [55]. ВОР может быть одно- или многоуровневым, обычным или плановым. Одно- или многоуровневый ВОР означает, что для описания структуры продукта используется обычный список или многоуровневое древовидное описание. Чем глубже эта древовидная структура, тем более жесткие требования предъявляются к точности данных о номенклатурных позициях, включаемых в эту структуру (рисунок 17).

← → ☆ 8800.0000 Изделие основное (Ресурсная спецификация)

[Основное](#) [Плановые калькуляции](#) [Дерево спецификации](#) [История загрузки объектов \(Объект обмена\)](#) [История согласований НСИ](#)

Дерево спецификации

На дату: 18.11.2018 Этапы Выходные изделия Материалы Трудозатраты

Номенклатура	Характеристика	Колич...	Ед.
⊖ 8800.0000 Изделие основное	<характеристик...	1,000	шт
⊖ Материалы и услуги (11)			
⊕ + 708000 Ящик транспортировочный	<характеристик...	1,000	шт
- 7870.0200 ФО Формуляр Главный редуктор ВР-14	<характеристик...	1,000	шт
⊖ + 7871.4400 Крышка передняя в сборе	<характеристик...	1,000	шт
⊕ Материалы и услуги (67)			
⊕ + 7872.0300 Корпус редуктора в сборе	<характеристик...	1,000	шт
⊕ + 7873.0100 Планетарная ступень редуктора	<характеристик...	1,000	шт
⊕ + 7874.0100 Привода	<характеристик...	1,000	шт
⊕ + 7875.0200 Поддон	<характеристик...	1,000	шт
⊕ + 7967.3900-02 Масляный агрегат редуктора	<характеристик...	1,000	шт
⊖ + 7971.0529 Заглушка специальная	<характеристик...	3,000	шт
⊖ Материалы и услуги (1)			
- алюмин прут пресс=д1*т=г21488-97=ф=12=	<характеристик...	0,015	кг
⊕ + 7971.0529-01 Заглушка специальная	<характеристик...	3,000	шт
⊕ + ОСТ 1 10067-71 Пломба	<характеристик...	1,000	шт

Рисунок 17 – Пример представления древовидной спецификации в 1С ERP

Результатом вышеперечисленных действий является описание потребности предприятия в производимых и закупаемых номенклатурных позициях, выраженное в виде календарного плана. Причем особо следует отметить, что

сам механизм MRP не делает различия между способами получения номенклатурных позиций (закупка или производство), предоставляя решать этот вопрос ответственным лицам, хотя всегда существует возможность задать способ получения той или иной, покрывающей потребность предприятия, номенклатурной позиции по умолчанию (обычно закупаемая или же обычно изготавливаемая).

С начала 70-х гг. популярность MRP поддерживается *APICS* (American Production and Inventory Control Society) [49], начавшей свою деятельность в области продвижения MRP с попытки убедить людей в том, что MRP является решением многих проблем, ибо дает возможность сформировать интегрированные системы налаживания коммуникаций внутри компании и поддержки принятия решений. Тем самым MRP помогает руководящим работникам находить наиболее эффективные способы управления бизнесом в целом. *APICS* подчеркивала, что для успешного внедрения программ MRP необходимы понимание со стороны менеджмента и тотальное обучение персонала. Роль же математических методик оптимизации принимаемых решений была *APICS* уменьшена. Подчеркивалось, что реальными проблемами являются проблемы дисциплины, образования, понимания и коммуникаций.

Явным недостатком на данном этапе развития технологии MRP была невозможность обновить результатную информацию, получаемую в ходе работы MRP, т.е. подстроиться под изменения, возникающие в случае изменений открытых заказов. Из-за этого первые MRP-системы называли «запустил и забыл» (launch and forget). В свою очередь, возможность обновления очень важна, так как среда, в которой используется MRP, весьма динамична, а частые изменения размеров заказов и сроков их выполнения не являются редкостью. Отсюда вытекает необходимость отслеживать текущее состояние открытых заказов.

Данная фаза развития стандарта MRP имела место при преобладающем характере пакетной обработки информации на удаленных вычислительных центрах (кустовых или корпоративных). Тогда интерактивные технологии развития еще не получили. Если учесть, что в настоящее время при современном уровне развития вычислительной техники, один запуск процедуры MRP в режиме полного пересчета, согласно статистическим данным, занимает от 3 до 8 часов (в среднем), можно представить, насколько возможности для оперативного моделирования ситуации были ограничены тогда, и становится ясно, что анализ «а что будет, если?..» практически не проводился. По сути, MRP просто фиксировала статический план в «развернутом» виде.

1.6.4 Технология MRPI/CRP

Очевидно, что с ростом возможностей в области обработки данных присущие MRP ограничения перестали удовлетворять менеджеров и сотрудников служб планирования. Поэтому следующим шагом стала возможность обрабатывать ситуацию с загрузкой производственных мощностей и учитывать ресурсные ограничения производства – CRP (Capacity Requirements Planning). Процедура CRP запускается после завершения процедуры MRP, так как исходными данными для CRP являются также результаты работы MRP в виде плановых заказов на номенклатурные позиции производства. Задачей CRP является проверка плана производства на выполнимость.

Для работы механизма CRP необходимы три массива исходных данных:

1. Данные о главном календарном плане производства (MPS). Они являются исходными и для MRP.

2. Данные о рабочих центрах. Рабочий центр, как отмечает APICS [45], — это определенная производственная мощность, состоящая из одной или нескольких машин (людей и/или оборудования), которая в целях планирования потребности в мощностях (CRP) и подробного календарного

планирования может рассматриваться как одна производственная единица. Можно сказать, что рабочий центр — это группа взаимозаменяемого оборудования, расположенная на локальном производственном участке. Для работы CRP необходимо предварительное формирование рабочего календаря рабочих центров с целью вычисления доступной производственной мощности.

3. Данные о технологических маршрутах изготовления номенклатурных позиций, содержащихся в спецификациях. Здесь указываются все сведения о порядке осуществления технологических операций и их характеристиках (технологические времена, персонал, другая информация). Этот массив данных «умноженный» на главный календарный план (MPS) формирует плановую загрузку рабочих центров.

CRP информирует обо всех расхождениях между планируемой загрузкой и имеющимися мощностями, позволяя предпринять необходимые регулирующие воздействия. При этом каждому изготавливаемому изделию назначается соответствующий технологический маршрут с описанием ресурсов, требуемых на каждой его операции, на каждом рабочем центре. Следует отметить, что CRP не занимается оптимизацией загрузки, осуществляя лишь расчетные функции по заранее определенной производственной программе согласно описанной нормативной информации.

После завершения работы CRP становятся доступны результаты расчета мощностей (рисунок 18)

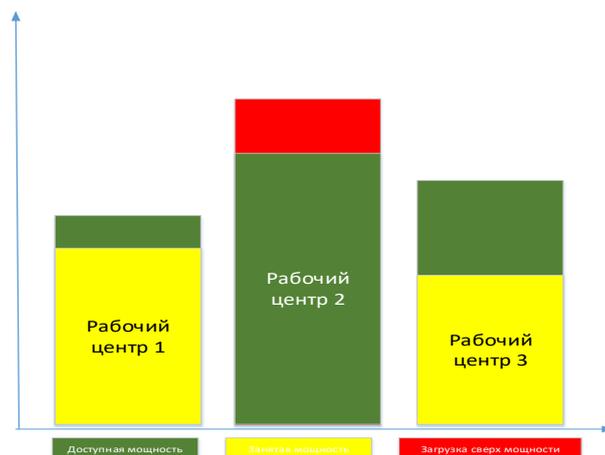


Рисунок 18 – Результат расчета CRP за период

Следует отметить, что результат расчета лишь констатирует, что некоторые мощности достаточны для выполнения плана, а некоторые мощности перегружены, но не предлагает алгоритма «расшивки» узких мест (подробнее об узких местах будет рассказано в главе 2.2). Корректировка плана производства и поиск допустимых решений могут быть получены на основе использования опыта и знаний лиц, принимающих решения. Человек последовательно анализирует дефициты, выявляя позиции, которые привели к перегрузу и осуществляет поиск периода, в который возможно данную загрузку перенести. Если такого периода нет, необходимо переносить план производства некоторых заказов на более поздние даты, что требует корректировки главного плана производства и так далее. Все эти процедуры крайне трудоемки на практике.

CRP и MRP можно с некоторой долей условности отнести к системам поддержки принятия решений, так как они позволяют просчитывать последствия, хотя и не выдают никаких практических вариантов преодоления возникших проблем. Иногда технологию MRP называют еще MRP I. Можно отметить, что налаженная технология MRP I/CRP при наличии достаточных вычислительных мощностей позволяет, по сути, осуществлять моделирование ситуации.

1.6.5 Замкнутый цикл MRP (Closed loop MRP)

Следующим этапом развития стал «Замкнутый цикл MRP» (closed loop MRP), предложенный в конце 70-х гг. Оливером Уайтом, Джорджем Плоссом и другими (Oliver Wight, George Plossl and others). Основная идея данного усовершенствования технологии MRP заключается в создании замкнутого цикла путем налаживания обратных связей, улучшающих отслеживание текущего состояния, поддержание мониторинга выполнения плана снабжения и производства. В результате применения нового метода значительно повышен уровень достоверности и точности плановых показателей. Дополнительно к системе MRP новый метод позволил автоматизировать фазы детального планирования и учета выполнения планов:

- формирование подробных графиков выпуска готовой продукции, поставок сырья, материалов и комплектующих для поставщиков;
- учет входного/выходного материального потока;
- диспетчирование хода производства и поставок;
- составление отчетности о предполагаемом отставании от графиков выпуска, графиков поставок и т.д.

Дополнительные функции обеспечивают обратную связь и гибкость планирования с учетом внешних экономических факторов (уровень спроса, состояние открытых заказов, движение материального потока и т.п.). В процесс управления вовлечены бизнес-процессы, которые связаны со снабжением и производством, но не бизнес-процессы продаж и финансового учета. Было необходимо реализовать мониторинг (диспетчирование) выполнения плана снабжения и производственных операций, что позволяло снять те ограничения степени достоверности результата планирования, ранее присущие MRP I, которые существовали из-за невозможности отследить состояние открытых заказов. С добавлением указанных функций к MRP I/CRP был сформирован стандарт «Замкнутый

цикл MRP», охватывающий все стороны бизнеса, связанные с изготовлением продукции.

Функции учета фактической деятельности были введены к MRP как дополнительная сущность к плану, и весь учет изначально строился «от плана». С сожалением следует отметить, что практика реализации проектов внедрения автоматизированных систем управления в России часто строится только на учете фактического выполнения операций, вообще без использования алгоритмов MRP, что делает АСУ, полученные в результате, малопригодными для реального управления предприятием. Также распространенным случаем являются системы, где функции планирования и учета выполняются полностью независимо друг от друга (например, планирование в Excel, а учет в «1С Управление производственным предприятием»), что делает невозможным сопоставление данных план-факт. Вклад таких систем в процессы управления производством можно считать равным нулю или же отрицательным. Наверное, именно этот факт стал причиной того, что подавляющее количество специалистов и руководителей на производстве (специалистов служб планирования, диспетчеров, начальников цехов и т.д.) крайне скептически относятся к возможности автоматизации процессов управления производством.

Для точности отражения информации следует привести определение, которое *APICS* дает методологии «Замкнутый цикл MRP» [56]: «Система, построенная вокруг планирования потребности в материалах (MRP), которая включает дополнительные плановые функции, а именно планирование производства (укрупненное планирование) (production planning (aggregate planning)), разработку главного календарного плана производства (master production scheduling) и планирование потребности в мощностях (capacity requirements planning). После того как вышеописанные фазы планирования пройдены и планы были приняты как реалистичные и достижимые, начинается исполнение планов. Это включает в себя такие

функции управления производством, как измерение входного/выходного материального потока (мощности) (input-output (capacity) measurement), формирование подробных графиков и диспетчирование, а также отчетность по предполагаемому отставанию от графиков от завода и от поставщиков, формирование графиков поставщиков и т.д. Термин «замкнутый цикл» означает, что существует обратная связь от функций исполнения, с тем чтобы планирование было всегда корректным» [57]. Следует отметить, что в процесс вовлечены только операции, связанные со снабжением и производством, а процессы сбыта (продаж) и финансового учета технологией не задействованы, хотя их включение в MRP-стандарт позволило бы нам не только замкнуть цикл управления, но и наладить полнофункциональную цепь поставок товарно-материальных ценностей по схеме «снабжение — производство — сбыт» и довести продукт до потребителя, гармонизировав тем самым комплексную технологию управления бизнесом.

1.6.6 Планирование ресурсов производства MRP II

MRP II (англ. manufacturing resource planning — планирование производственных ресурсов) [58] – стратегия производственного планирования, обеспечивающая как операционное, так и финансовое планирование производства, обеспечивающая более широкий охват ресурсов предприятия, нежели MRP. В отличие от MRP, в системе MRP II производится планирование не только в материальном, но и в денежном выражении. Реализуется внедрением прикладных программных пакетов. MRP II задаёт принципы детального планирования производства предприятия, включающая учёт заказов, планирование загрузки производственных мощностей, планирование потребности во всех ресурсах производства (материалы, сырьё, комплектующие, оборудование, персонал), планирование производственных затрат, моделирование хода производства, его учёт, планирование выпуска готовых изделий, оперативное корректирование плана и производственных заданий. Стандарт

MRP II (Manufacturing Resource Planning) позволил развить технологию планирования, ориентированную на применение корпоративных информационных систем, очертив полный контур задач управления промышленным предприятием на оперативном уровне.

Важнейшая функция MRPII состоит в обеспечении всей необходимой информацией тех, кто принимает решения в сфере управления финансами, включая лучшие практики предыдущих этапов развития автоматизированных систем:

- MRP информирует о сроках выполнения заказов на закупку, помогая планировать осуществление расчетов с поставщиками.
- MRP I/CRP предоставляет информацию о количестве основного производственного персонала, уровне часовых тарифных ставок и нормах времени на выполнение технологических операций (в описании технологических маршрутов), о возможных сверхурочных работах и т.д., необходимую для принятия предприятием обязательств по выплате заработной платы.
- Наконец, MRP II сообщает об объемах и сроках поставки изделий покупателям, что позволяет прогнозировать поступление денежных средств и свести баланс доходов и расходов.

Необходимо отметить, что для обеспечения достоверности результатов критически необходимо обеспечение точности и своевременности входной информации нормативного и оперативного характера (чтобы избежать реализации принципа GIGO — garbage in, garbage out).

Одной из основных причин того, что MRP II была с готовностью воспринята как методология управления производством, является ее обращение к возможностям вычислительной техники в области хранения и обработки больших массивов данных и предоставления доступа к ним в целях эффективного управления предприятием. Она помогает координировать деятельность различных подразделений предприятия по исполнению

своих функций. Поэтому привлекательность MRP II состоит не только в поддержке принятия решений, но и, что более важно, в ее интеграционной роли для производственных предприятий.

Приведем краткую характеристику модулей MRP II:

1. Управление продажами [59]:
 - a. управление спросом (Demand Management);
 - b. управление продажами (Sales & Operations Planning);
 - c. учет продаж и взаиморасчетов с клиентами;
 - d. планирование ресурсов распределения (Distribution Resource Planning).
2. Планирование ресурсов:
 - a. главный календарный план производства (Master Production Schedule);
 - b. подсистема спецификаций (Bill of Material Subsystem);
 - c. планирование потребности в материалах (Material Requirements Planning);
 - d. планирование потребности в мощностях (Capacity Requirements Planning).
3. Управление закупками [60]:
 - a. подсистема операций с запасами (Inventory TransactionSubsystem);
 - b. управление закупками (Purchasing);
 - c. учет закупок и взаиморасчетов с поставщиками;
 - d. подсистема запланированных поступлений по открытым заказам (Scheduled Receipts Subsystem).
4. Управление производством [61]:
 - a. оперативное управление производством (Shop Floor Control или Production Activity Control);

b. управление входным/выходным материальным потоком (Input/Output Control);

c. инструментальное обеспечение (Tooling или Tool Planning and Control).

5. Финансы моделирование и контроллинг:

a. финансовое планирование (Financial Planning Interfaces);

b. моделирование (Simulation);

c. учет затрат;

d. оценка деятельности (Performance Measurement).

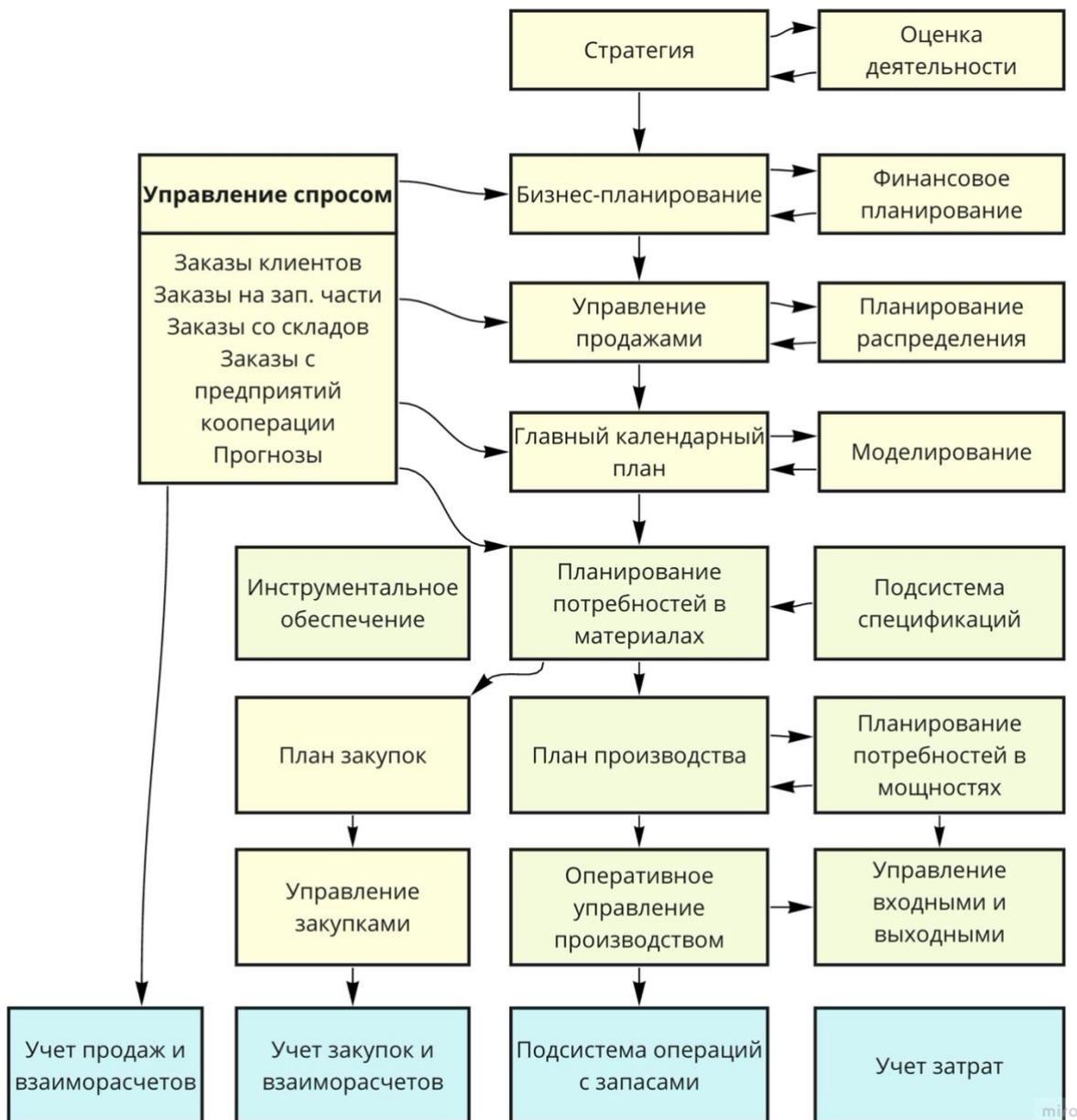


Рисунок 19 – Модули MRP II

1.6.7 Планирование в APS

Отдельным ответвлением от развития MRP систем стали системы асинхронного планирования цепей поставок APS, которые появились на рынке в середине 90-х годов. Причиной их появления стала низкая достоверность планирования, которая была выявлена в ходе опыта эксплуатации MRP II и повышении требований рынка соблюдения сроков поставки и производства «точно вовремя». Стало очевидно, что для реального управления производством требуется полная прозрачность производственных цепочек от поставок материалов до отгрузки готовых изделий потребителю, что привело к созданию новых алгоритмов сквозного планирования с учетом доступности всех видов ресурсов. APS развивалась в рамках новой в то время концепции управления цепями поставок, которые рассматривали планирование не как систему отдельных планов (продажи, закупки, производство), а как полную цепочку материального потока, начиная от поставок сырья поставщиками заканчивая доставкой готовой продукции заказчику, с учетом всех логистических операций внутри цепи поставок. Для такой концепции были необходимы новые инструменты и математические модели, позволяющие делать детальные расчеты с учетом всех операций. Синхронность работы предприятия строится на сквозном планировании материалов, ресурсов и одновременно построении расписания с учетом загрузки оборудования.

Расписания строятся для всех подразделений предприятия с учетом сроков поставок партнеров и расписания для всех этих производственных структур являются всегда взаимоувязанными во времени. Оперативное перепланирование начинается в случае, если изменения происходят во внешней среде (корректировка сроков поставок, появление новых заказов клиентов и прочее), учет же внутренних возмущений со стороны производственных подразделений (поломки оборудования, брак на

операциях и т.п.) и служб снабжения (снабжение, логистика) приводит к необходимости перестраивать полное расписание выполнения работ, что является проблемой (требуется обработка слишком больших массивов информации в короткие сроки). Это привело к тому, что от оперативного перепланирования большинство предприятий было вынуждено отказаться.

По сравнению с алгоритмами MRP II, алгоритмы APS учитывают переналадки и некоторые другие параметры технологической среды. Алгоритм планирования осуществляет распределение множества операций, выполнение которых необходимо для выполнения портфеля заказов по всему множеству станков с учетом их загруженности. Ограничения разделяются на важные и не очень. В начале, на первом проходе алгоритма составляется расписание с учетом выполнимости важных ограничений, например, отсутствие нарушения сроков поставок. Если расписание получено, то оно считается допустимым и принимается в качестве базового для дальнейшей «оптимизации». На последующих проходах алгоритма проводится попытка учесть оставшиеся менее важные ограничения. Данный итерационный процесс получения допустимого расписания с учетом новых ограничений, вносимых на новой итерации. В ряде случаев процесс планирования упрощают еще сильнее. Сначала планируют одну деталь, потом другую, до тех пор, пока все множество деталей не будет спланировано. Оценка полученных расписаний относительно действительного оптимума при этом может быть достаточно низкой.

После своего появления APS-системы достаточно быстро начали захватывать рынок. При этом некоторые эксперты прогнозировали «смерть ERP», хотя никаких реальных предпосылок к этому не было. APS – это, в первую очередь, новый алгоритм, который решает задачу планирования производства и поставок по новому. При этом результаты планирования также могут быть использованы в ERP-системе. Ключевые разработчики ERP-систем (SAP, Oracle и др.) также включили APS-алгоритмы в свои ERP-

системы, таким образом APS следует рассматривать как еще один этап развития ERP.

1.6.8 Планирование в MES

Отдельно следует сказать про параллельный класс информационных систем, развитие которых проходило одновременно с развитием MRP – MES (manufacturing execution system, система управления производственными процессами) — специализированное прикладное программное обеспечение, предназначенное для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции в рамках какого-либо производства. Первые подобные системы появились практически одновременно с MRP и были предназначены для оптимизации процесса управления производством внутри одного цеха. Сегодняшняя общепризнанная классификация [52] приводит следующий состав функциональных блоков, реализуемых MES:

1. DPU (Dispatching Production Units) – диспетчеризация производства. Управляет очередью заказов (в контексте MES заказом является задание на обработку партии деталей в цехе). Позволяет управлять последовательностью обработки заказов, и отследить в режиме реального времени все виды отклонений. Позволяет своевременно реагировать и вносить корректировки в план в случае выявления брака и дефектов.
2. ODS (Operations/Detail Scheduling) – оперативное детальное планирование. Осуществляет оперативное планирование производства внутри цеха с точностью до технологических операций, учитывает множество факторов и характеристик для максимально точного планирования с учетом всех видов ограничений, переналадок оборудования, смены инструмента, квалификации рабочих и технического состояния оборудования.

3. RAS (Resource Allocation and Status) – управление ресурсами, в т.ч.: станками и оборудованием, материалами, персоналом, а также конструкторско-технологической документацией и стандартами, которые используются при производстве. Система осуществляет онлайн-мониторинг наличия ресурсов и реагирует на отклонения.
4. LM (англ. Labor Management) – управление персоналом и трудозатратами.
5. QM (англ. Quality Management) – управление качеством. Предназначена для обеспечения непрерывного контроля качества в производстве. Позволяет осуществлять мониторинг качества, анализ причин возникновения дефектов и реагировать на отклонения, а также управлять работой лаборатории с помощью дополнительной системы LIMS (лабораторные информационно-управляющие системы).
6. DOC (Document Control) – обеспечение документацией. Система управляет документационным обеспечением процесса производства, контролирует статусы документов, наличие и актуальность.
7. PM (Process Management) – система управления процессом производства. Позволяет визуализировать производственный процесс с учетом необходимых параметров и вносить корректировки в параметры работы оборудования при необходимости. Возможен даже режим автоматической работы системы, при котором система самостоятельно реагирует на отклонения и вносить изменения. В России такие системы относятся к классу АСУТП.
8. MM (Maintenance Management) — управление техобслуживанием и ремонтом. Система предназначена для комплексной

автоматизации всех процессов технологического обслуживания и ремонта оборудования в соответствии со стандартом TPM.

9. PTG (Product Tracking and Genealogy) — отслеживание и генеалогия продукции, отвечает за процесс отслеживания партий деталей в производстве.
10. PA (Performance Analysis) — анализ производительности, предназначена для построения отчетности и контроля хода производства.
11. DCA (Data Collection/Acquisition) – подсистема управления и хранения данных. Осуществляет сбор статистики и агрегирует данные для последующего анализа.

Безусловно, MES являются крайне мощными системами автоматизации процесса управления производством, но ориентация на внутрицеховое управление не позволяет рассматривать данную систему как замену APS или же ERP [62, 63]. MES всегда используется в связке с другими системами для получения мастер-планов, заказов и т.д. MES фокусируется на детальности данных и точности внутрицехового планирования, в противовес системам уровня предприятия, которые используют укрупненное планирование.

Важным свойством MES являются алгоритмы многокритериальной оптимизации плана производства [64, 65, 66, 67, 68], которые ввиду сложности недоступны системам уровня предприятия. Алгоритмы MES-систем являются достаточно сложными эвристическими алгоритмами, способными к многокритериальной оптимизации, оставаясь при этом быстрыми и эффективными. Некоторые математические модели и алгоритмы решения будут рассмотрены в данной работе.

Как видно из сказанного выше, MES может стать для предприятия крайне полезным инструментом управления производством, и может создаться впечатление, что внедрение MES – в принципе панацея от всех

проблем предприятия. Оптимальное планирование, максимальная детализация и учет ограничений – это то, чего хотят большинство заказчиков при инициации проекта управления производством. Значит ли это, что MES сможет заменить MRP II? Ни в коем случае, ведь спектр бизнес-процессов, управляемых MRP II намного шире, чем в MES, и покрывает весь процесс формирования добавленной стоимости – от закупок до продаж и отгрузки готовой продукции с учетом финансов и экономики.

Следовательно, MRP II и MES должны работать на предприятии одновременно? Да, именно так. И это несет в себе массу проблем стыковки систем, интеграции и передачи информации между системами. Это крайне сложный процесс, который связан с множеством ошибок и прочих проблем. Сложность качественной интеграции MRP II и MES может быть так высока, что иногда может превышать сложность внедрения MES.

1.6.9 Планирование ресурсов предприятия ERP

Следующим шагом развития систем управления предприятием стало создание ERP (Enterprise resource planning, планирование ресурсов предприятия), более совершенной системы, чем MRP II. Термин ERP, согласно *APICS*, означает «финансово ориентированную информационную систему для определения и планирования ресурсов предприятия, необходимых для получения, изготовления, отгрузки и учета заказов потребителей [69].

ERP отличается от предшественников в первую очередь архитектурой построения решения, отказ от полностью монолитного программного продукта в пользу поддержки современных тенденций проектирования комплексных систем:

1. Развитый интерфейс пользователя;
2. Переход на трехзвенную архитектуру;
3. Открытый исходный код основных модулей и возможность адаптации решений под конкретного заказчика;

4. Модульность решения.

Развитие концепции ERP привело к тому, что большинство производителей ERP-систем стали включать в свои системы собственные модули MES или же включать в ERP средства интеграции с существующими MES. Аналогичная ситуация произошла и с APS-системами, многие производители ERP разработали собственные модули и включили их в состав поставляемых ERP решений [70]. Такой подход несет в себе массу плюсов:

1. данные в системе гарантировано актуальные, без возможности разночтений;
2. единый инструмент позволит построить сквозное управление предприятием.

На сегодняшний день направление ERP является актуальным и динамично развивается в следующих направлениях:

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. Такая архитектура позволяет предприятиям создавать единую информационную систему из модулей разных производителей, исходя из своих уникальных потребностей.
3. Развитие облачных решений. Практически все производители программных решений позволяют использовать их продукты как на собственных серверных мощностях, так и в виде облачных решений, что увеличивает доступность решения для удаленной работы, снижает затраты на инфраструктуру.

4. Поддержка мобильных клиентов. Уже сегодня, до половины всей информации генерируется и потребляется на мобильных устройствах. Безусловно эта тенденция будет продолжена, в том числе для бизнес-приложений. Наличие мобильных клиентов для всех платформ станет в ближайшее время стандартом отрасли.
5. Расширение функциональности решений без снятия с поддержки. Практически все ERP-системы, существующие на рынке, имеют встроенные механизмы внесения изменений в бизнес-логику работы системы и настройках, однако, каждое изменение типового решения поставщика приводит к необходимости сопровождения таких изменений и значительно увеличивает затраты на обновление программного обеспечения. На сегодняшний день свое развитие получили механизмы расширения функциональности без снятия решения с поддержки и возможностью быстрого отключения таких расширений.
6. Развитие средств онлайн-интеграции с другими системами и интернетом вещей. Данное направление развития является ключевым для развития ERP-систем. Все больше данных генерируется в смежных системах автоматически. Использование дублированного ввода данных в ERP человеком уже сегодня считается плохим тоном.
7. Развитие направлений B2B, B2C и юридически-значимого документооборота. Данное направление приведет к тому, что ERP-системы различных предприятий будут обмениваться данными о заказах, состоянии выполнения, сроках поставки и платежах автоматически, без необходимости работы операторов. С использованием интернет-магазинов и прочих смежных систем, взаимодействие с частными покупателями также может быть полностью автоматизировано.

1.6.5 Цифровое производство

Основными особенностями современного предприятия становятся кардинально изменившийся поток информации, влияющий на принимаемые решения, и имеющийся доступ к различным, постоянно меняющимся технологиям.

Цифровое предприятие, виртуальная фабрика, Индустрия 4.0, безлюдное производство, безлюдный склад, аддитивные технологии – эти понятия на сегодняшний день все чаще встречаются в обиходе и формируют тренд развития промышленности по всему миру [71, 72]. Само понятие «цифровое производство» достаточно известно уже более 10 лет. При своем появлении, понятие цифровое предприятие включало лишь набор инструментов проектирования изделий, подготовки производства и организации производства с использованием станков с ЧПУ в виде единого процесса, где модели передавались от одного инструмента к другому в цифровом виде, исключая потери и ошибки, связанные с интерпретацией чертежей и несовместимостью программного обеспечения. Следующим шагом стала интеграция данных с MES-системой и ERP, которые также используют данные о составах изделий, спецификаций материалов, параметры выполнения технологических процессов. Так появилась концепция управления жизненным циклом изделия (product lifecycle management system), которая должна управлять данными об изделии от момента получения задания на проектирование до утилизации изделия, отработавшего свой ресурс. Практическая реализация PLM позволяет комплексно автоматизировать все основные стадии жизненного цикла изделия (исследовательская работа, проектирование, подготовка производства, производство, эксплуатация и утилизация) [73].

Цифровое производство базируется на технологиях 3D-моделирования и бесшовной передачи данных моделей на следующие этапы проектирования, производства и эксплуатации изделий [74]. Массовое

применения оборудования с числовым программным управлением доказало состоятельность и необходимость практической реализации концепции [75].

Авторы [72] сформулировали основные направления развития в этой области:

- Развитие инструментальных средств PLM, с поддержкой все большего количества процессов.
- Развитие автономных роботов.
- Горизонтальная и вертикальная интеграция систем.
- Развитие технологий интернета вещей, когда «умные устройства» способны самостоятельно обмениваться информацией с друг-другом и становятся полноценными участниками производственного процесса наряду с человеком [76].
- Управление большими данными (big data) и бизнес-аналитика, которые возникают в процессе производства.
- Развитие технологий 3D-печати.

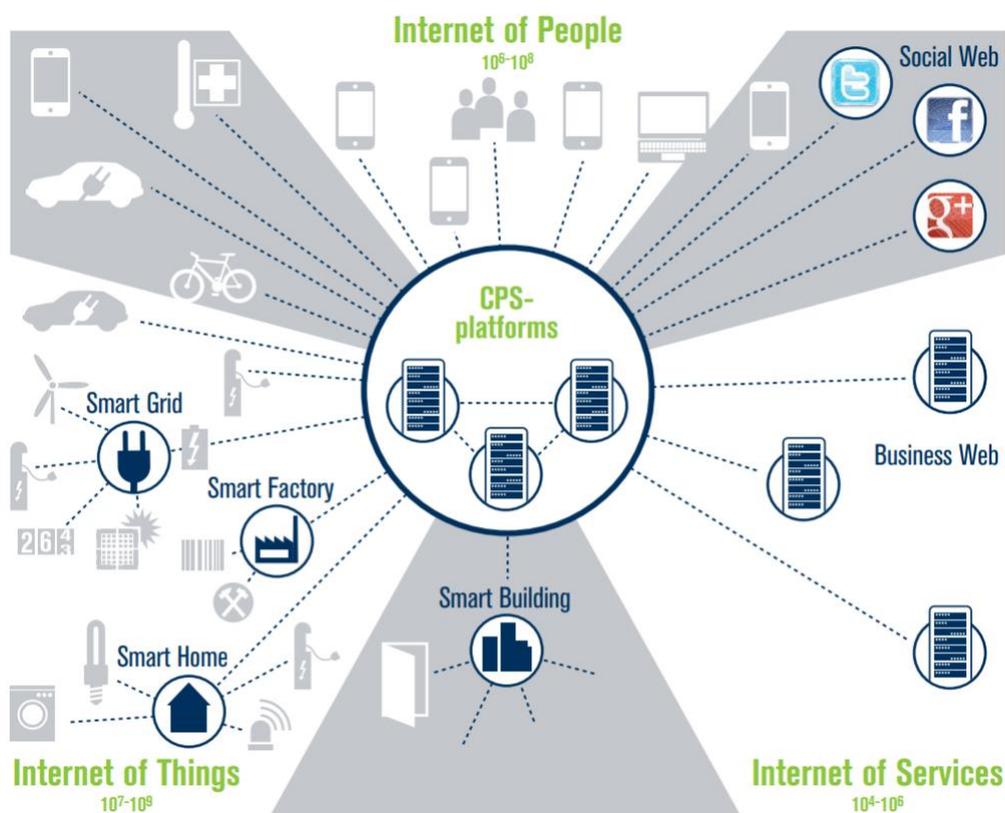


Рисунок 20 – Интернет вещей и сервисов

Внедрение цифрового производства приводит к следующим изменениям:

- 1) существенно сокращаются сроки и стоимость проектирования продукта и подготовки производства;
- 2) значительно возрастает производительность труда;
- 3) сокращаются потери, связанные с ошибками проектирования и доводкой изделий на стадии запуска производства;
- 4) повышается качество выпускаемой продукции;
- 5) сокращаются сроки производства и запасы незавершенной продукции.

Развитие цифрового производства открывает возможности для массового производства изделий по индивидуальным заказам. У такого подхода действительно огромный рыночный потенциал, который смогут

освоить только те компании, которые при эволюционном развитии прошли все стадии автоматизации и цифровизации производства.

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время созданы все предпосылки и разработаны основные инструменты для перехода к цифровому производству. Однако, каждое промышленное предприятие в лице его руководства на этом переходе должно решить для себя какие принципы и модели управления производственной системой будут использоваться ими в соответствии со стратегическими целями и учетом специфики предприятия.

1.7. Необходимость интеллектуализации системы управления

После завершения стадии внедрения ERP-системы (в расширенном понимании, включая функциональность APS и MES), руководство предприятия получает в свое распоряжение гигантские объемы информации о своем бизнесе, буквально гигабайты первичных данных, которые содержат структурированную информацию достаточную для принятия оперативных решений после проведения дополнительного анализа. Однако при таких больших объемах информации сама задача анализа информации и принятия решений на основании полученного анализа становится предельно сложной.

Мозг человека способен обрабатывать весьма ограниченные объемы информации, безусловно, существующие системы отчетности автоматизированных систем позволяют агрегировать информацию, получать средние значения и итоги, но такой детализации данных часто не хватает для принятия действительно обоснованных решений. Для выхода из данной ситуации хорошим решением видится делегирование задач анализа и принятия решений самой автоматизированной системе. Поскольку данные процессы всегда считались прерогативой человека, такие системы автоматически можно считать интеллектуальными. Рассмотрим существующие решения в этой области.

Первым классом интеллектуальных автоматизированных систем следует считать системы поддержки принятия решений (СППР) – соединение комплекса программных средств и аналитических моделей для решения широкого круга сложных задач в различных областях жизни, в т.ч. и в экономике, прежде всего, в производстве. Это направление менеджмента использует достижения в развитии информационных систем и банков данных, исследовании операций, интерактивных режимов работы с ЭВМ. Мощное математическое обеспечение позволяет формулировать цели управления, корректировать их с учетом желаний и опыта менеджеров (этот опыт автоматически формализуется и фиксируется системой в процессе ее работы), находить и предлагать оптимальные средства и пути достижения целей. Существуют системы поддержки не только индивидуальных, но и коллективных решений. В последнем случае специальная программа ранжирует участников по степени их компетенции, учитывая это при согласовании мнений и выработке обобщенных рекомендаций. Многие СППР основаны на формализации функции полезности пользователя и выдаче альтернативы, максимизирующей эту функцию [77, 78, 79].

Также рассмотрим определение интеллектуальной системы (ИС, англ. intelligent system) – это техническая или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы [80, 81, 82]. В технологиях принятия решений интеллектуальная система — это информационно-вычислительная система с интеллектуальной поддержкой, решающая задачи без участия человека — лица, принимающего решение (ЛПР) [83]. Понятие интеллектуальной системы тесно связано с областью информатики, называемой искусственным интеллектом (ИИ). Существует много различных определений ИИ. Ниже приведены некоторые из них [84]:

«Автоматизация видов деятельности, которые мы ассоциируем с человеческим мышлением (human thinking), таких как принятие решений, решение проблем, обучение ...» (Belman, 1978);

«Изучение того, как заставить компьютеры делать вещи, которые в настоящее время лучше делают люди» (Rich, Knight, 1991) [84].

К одним из бурно развивающихся технологий ИИ относятся:

1. Мягкие вычисления (нечеткие множества, нечеткая логика и т.п.).
2. Интеллектуальные агенты и мультиагентные системы.
3. Интеллектуальный анализ данных [85].

Первым шагом интеллектуализации систем можно считать построение развитой отчетности и подсистемы бизнес-аналитики на первичных данных ERP. Качественная система бизнес-анализа формирует практически готовые решения: какие заказы следует отменить, какую дополнительную продукцию нужно произвести для восполнения брака, по каким заказам следует повысить приоритет, каким клиентам следует приостановить отгрузку ввиду наступления просроченной задолженности и т.д. При этом в реальных условиях крайне важна своевременность принятия решений (чем раньше выявлена проблема и приняты меры к решению, тем меньше негативных последствий для предприятия). Поэтому следующим шагом развития автоматизированных систем является передача полномочий принятия решений непосредственно автоматизированной системе управления: автоматически открыть заказы на производство, приостановить производство невостребованных товаров, направить электронное письмо клиенту с уведомлением об изменении условий поставки и т.д. Данный момент можно считать моментом появления интеллектуальной информационной системы.

На данный момент интеллектуальные функции автоматизированных систем, как правило, развиваются предприятиями самостоятельно, исходя из специфики бизнес-процессов предприятия и принятым стандартам

ведения бизнеса. Чем выше стандартизация процессов предприятия, тем больше функций можно передать в область компетенции интеллектуальной системы управления. Вероятно, ведущие разработчики ERP-систем также будут развивать интеллектуальные функции в своих системах, создавая встроенные механизмы глубокого анализа данных и гибкие системы конфигурации правил для интеллектуального принятия решений в автоматическом режиме.

Выводы по главе

За последние годы получили свое развитие методологии моделирования бизнес-процессов, автоматизированные системы управления предприятием (ERP/MES/APS), практики построения и оптимизации производственных процессов (Lean, TOC, QRM), технологии цифрового производства (PLM/IoT) [86, 87, 88]. Развитие всех этих направлений является крайне важным для производственных предприятий и позволяет решать многие проблемы и отвечать на вызовы времени. Использование инструментов развития производственных систем, реинжиниринга и автоматизации бизнес-процессов вместе или по отдельности позволило тысячам компаний по всему миру радикально повысить эффективность работы, увеличить прибыль и улучшить рыночные позиции [89, 90]. Однако следует отметить, что совместное использование данных инструментов затруднено тем, что развивались они параллельно, без оглядки друг на друга, местами исследователи даже настаивают на отказе от использования тех или иных инструментов, считая их не просто неэффективными, но и несущими дополнительные потери и деградацию производственной системе предприятия [91]. Вопросу совместного использования инструментов и получению синергетического эффекта от их использования посвящена существенная часть данного исследования. В следующих главах будут показаны многие возможности совместного использования подходов для решения различных задач управления предприятием.

Вторым важным аспектом, следующим из обзора существующих методологий, является их применимость и специализированность. Например, бережливое производство направлено на построение массовых поточных производств, подобных автомобильным заводам Тойоты; QRM наоборот фокусируется на производстве продуктов мелкой серией при организации производственных линий исходя из параметров независимого спроса на виды продукции. В связи с этим возникает вопрос о применении

тех или иных инструментов в компаниях, которые по некоторым характеристикам отличаются от тех, которые были описаны в литературе. В качестве основного объекта исследования будет рассмотрена производственная система характерная для мелкосерийных позаказных производств сложной наукоемкой продукции. На сегодняшний день эффективность данных производств остается низкой, в системе крайне много потерь, остаются длительные циклы производства продукции и высокий уровень запасов на всех этапах производства. Текущий уровень развития технологий диктует новые правила работы производства требуя максимальной кастомизации товаров под потребности потребителя, что требует от производителей товаров снижать размер партии заказов, постоянно быть готовыми производить новые виды продукта, производить продукцию по индивидуальным заказам. В купе с изменчивостью спроса на рынке это ставит перед руководством предприятия сложные задачи, которые тем сложнее, чем сложнее процесс производства продукта, чем больше деталей входит в его состав, чем длиннее технологические цепочки на предприятии. Все это требует создания новых инструментов управления производственным предприятием с использованием опыта создания автоматизированных систем управления, моделирования бизнес-процессов и лучших практик построения и оптимизации производственных процессов.

Использование в качестве объекта исследования такой сложный вид производственной системы позволит проверить универсальность применения различных методологий и при необходимости адаптировать заложенные в них принципы и сделать их более универсальными, при этом решая практические задачи в условиях именно этого типа производственной системы.

Глава 2. Концепция интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством

2.1. Интеллектуальное предприятие

2.1.1 Экономические и социальные предпосылки появления интеллектуальных предприятий

С момента появления первых счет (3000 лет до нашей эры) до появления первых электронных вычислительных машин (40-е годы двадцатого столетия) прошло почти пять тысяч лет, т.е. вычислительная техника сопровождала человечество на протяжении практически всей истории. Все это время влияние вычислительной техники на историю человечества нельзя назвать глобальным. Однако ситуация резко изменилась за последние полвека. Компьютеры плотно вошли во все сферы деятельности человека. Они радикально меняют скорость и производительность многих процессов, создают новые возможности, представить которые ранее было невозможно.

Данная работа посвящена узкой области использования интеллектуальных систем – созданию интеллектуальных промышленных предприятий. Ниже будут подробно рассмотрены определения интеллектуальных систем, история возникновения, основные этапы развития и перспективы будущего. Индустрия 4.0, промышленные роботы, интернет вещей – все это уже существующие технологии, которые будут определять облик промышленного предприятия в будущем. Это сегодня популярные темы, но мало кто может сказать, что видит картину в целом, как реально будет развиваться промышленность при переходе к стадии построения интеллектуальных предприятий.

Рассмотрение данного вопроса следовало бы начать, собственно, с определения того, а чем же является интеллектуальное предприятие. На сегодня не существует устоявшегося и общепризнанного определения того, что же является интеллектуальным предприятием. Предприятие —

самостоятельный, организационно-обособленный хозяйствующий субъект с правами юридического лица, который производит и сбывает товары, выполняет работы, оказывает услуги [3]. В современных условиях предприятие является основным звеном рыночной экономики, поскольку именно на этом уровне создаются нужные обществу товары, оказываются необходимые услуги. Предприятие как юридическое лицо имеет право заниматься любой хозяйственной деятельностью, не запрещенной законодательством и отвечающей целям создания предприятия, предусмотренным в уставе предприятия. Предприятие имеет самостоятельный баланс, расчетный и иные счета в банках, печать со своим наименованием [3].

Искусственный интеллект (ИИ; англ. artificial intelligence, AI) – наука и технология создания интеллектуальных машин, особенно интеллектуальных компьютерных программ [84]. Свойство интеллектуальных систем – выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека [92, 93]. ИИ связан со сходной задачей использования компьютеров для понимания человеческого интеллекта, но не обязательно ограничивается биологически правдоподобными методами [94]. Существующие на сегодня интеллектуальные системы имеют очень узкие области применения. Например, программы, способные обыграть человека в шахматы, не могут отвечать на вопросы и т. д. [95]. Возможность формирования идеи интеллектуального предприятия появилась во многом благодаря развитию информационных технологий (ИТ, также — информационно-коммуникационные технологии), под которыми понимаются процессы, методы поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления, распространения информации и способы осуществления таких процессов и методов [96]; приёмы, способы и методы применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения,

обработки, передачи и использования данных (ГОСТ 34.003-90) [97]; ресурсы, необходимые для сбора, обработки, хранения и распространения информации [98]. Исходя из предложенных определений, очевидно, что под интеллектуальным предприятием понимается некое промышленное предприятие (завод), которое управляется искусственным интеллектом и возможно полностью обходится без людей.

Известные фантасты уже в двадцатом веке описали то, какими будут предприятия будущего. Интеллектуальный холодильник проанализирует наличие продуктов, выявит потребность в восполнении запасов продуктов, направит заказ в интеллектуальный агрегатор заказов, который сформирует заказ на производство интеллектуальному предприятию, которое, в свою очередь, в полностью автоматическом режиме произведет необходимые товары с использованием промышленных роботов, станков с ЧПУ, автоматических систем хранения и беспилотных транспортных средств [99, 100, 101]. Человеку остается лишь созерцать работу идеально функционирующего механизма [100]. Возможно, искусственный интеллект оставит человеку сферу творчества и исследований, но как сегодня показывает жизнь – это вовсе не гарантировано, взять хотя бы искусственный интеллект, который уже сегодня пишет музыку, проектирует новые изделия и т.п.

При этом мы понимаем, что до такого будущего вроде бы еще далеко, но ведь уже сегодня существуют заводы, на которых до 90% всех работ выполняют роботы; станки с ЧПУ за одну установку выполняют обработку детали, которую ранее осуществляли десятки людей; автоматические системы складского хранения полностью автоматически управляют работой склада; беспилотные автомобили вот-вот появятся на улицах крупных городов [102,]. И эта тенденция с каждым днем прослеживается все сильнее. И тут, конечно, нельзя не задать себе еще один вопрос – а чем будут заняты люди, которые ранее трудились в тех сферах деятельности,

которые теперь переданы в компетенцию искусственного интеллекта? На этот вопрос на сегодня ответа нет и это обстоятельство очень настораживает. Здесь следует задать и еще один вопрос – а зачем человечество с такой скоростью движется к тому, чтобы передать все компетенции искусственному интеллекту? А ответ крайне прост – те операции, которые подлежат к передаче в область ведения искусственного интеллекта, как правило, выполняются в сотни раз эффективнее, быстрее, с меньшим количеством ошибок, круглосуточно и без выходных. Как правило, это приводит к существенному росту производительности и эффективности предприятия, что увеличивает прибыль предприятия и создает возможность для дальнейшего развития, а далее цикл повторятся снова и снова [103, 104, 105].

При этом каждый день появляются новые технологии и научные открытия, которые позволяют решать все более сложные и сложные задачи, сами технологии становятся дешевле, а производство роботов доступнее.

При этом переход в состояние будущего произойдет не завтра, человечеству предстоит еще пройти большой путь, разработать математические модели процессов, решить множество сложных математических задач и научить искусственный интеллект решать эти задачи [105]. Кроме того, надо понимать, что переход к полностью автоматическим предприятиям будет постепенным, а это значит, что человек еще долго будет играть основную роль в процессах управления предприятием и в основной деятельности предприятия, что означает, что искусственному интеллекту предстоит работать с человеком, учитывать человеческий фактор и менталитет. Эти обстоятельства чрезвычайно усложняют задачи управления предприятием, ведь речь идет не об управлении механической системой, а об управлении сложной социально-технической системой с множеством неопределенностей, накопленных неточностях информации и ошибках.

Целью данной работы является исследование проблем, характерных для управления производственным предприятием, постановке и решении актуальных задач управления производством и практике построения интеллектуальных систем управления предприятием.

2.2.1 Основные признаки интеллектуального предприятия

В современных условиях быстроменяющейся конъюнктуры рынков сбыта, труда, технологий и инноваций эффективное управление промышленным предприятием становится все более сложной проблемой. В новом технологическом укладе резко возрастает роль информационных технологий, связанных с развитием глобальных информационных систем, искусственного интеллекта и интегрированных высокоскоростных систем коммуникаций. Информационное общество испытывает постоянный дефицит полезной информации, необходимой для принятия правильных решений [106]. Это в полной мере относится и к промышленному предприятию, успешное функционирование и развитие которого напрямую связано с использованием новых моделей организации производства и специальных механизмов управления эволюцией предприятия. Как утверждают авторы [107, 108], наиболее эффективно овладевает капиталом предприятие, обеспечивающее самоорганизацию, а также обучение и адаптацию его работников в условиях быстрых изменений. В рамках этой концепции предприятие рассматривается как развивающаяся система, в основе которой лежит самоорганизация. При этом такая система обычно имеет иерархическую структуру, так или иначе упорядоченную на каждом из уровней иерархии. Управление большой и сложной производственной системой предусматривает постоянное и интенсивное взаимодействие с внешним миром, в том числе информационный обмен. Такие системы принято называть открытыми, в которых при определенных условиях возможны процессы самоорганизации, т.е. возникновение устойчивых состояний организованности и поддержания порядка в системе. В качестве

меры упорядоченности часто используют энтропию. Поэтому логично управлять упорядоченностью системы путем снижения или повышения ее энтропии в зависимости от стратегических целей предприятия [109]. Другими словами, необходимо создавать условия для самоорганизации системы и обоснованно ожидать появления новых структур, приводящих к новому устойчивому состоянию. Для повышения организованности сложной производственной системы необходимо оказать на нее дополнительное внешнее воздействие, т.е. увеличить степень открытости, которой будет соответствовать новый, более высокий уровень организации системы. Однако, размыкая систему с целью ее самоорганизации, необходимо обосновать возможную степень ее синергетической открытости, т.к. превышение допустимого порога может привести к тому, что система, не успев самоорганизоваться, разрушится [110,111].

Кроме обеспечения самоорганизации с целью своего развития предприятие должно непрерывно использовать обучение и адаптацию, для чего необходим интеллект. Поэтому в [112] дается следующее определение: «*Интеллектуальное предприятие* – это самоорганизация, обучение и адаптация». Это определение подразумевает, что способность к самоорганизации органически присуща предприятию как развивающейся системе, а способность к обучению и адаптации – интеллекту. При этом интеллектуальное предприятие реализует процессы обучения и адаптации с помощью «спиралей прогресса», которые представляют собой восходящие последовательности циклов «исследование-производство» [113]. Каждый цикл повышает эффективность производства и качество выпускаемой продукции за счет внедрения новых технологий и выпуска новых продуктов, т.е. инноваций. Поэтому первым важным признаком интеллектуальности предприятия является количество контролируемых им «спиралей прогресса», с помощью которых постоянно решаются задачи овладения капиталом в изменяющихся условиях. Для реализации циклов

«исследование-производство» структура предприятия должна включать научно-исследовательское подразделение, специальное конструкторское бюро и опытное производство. Поддержание «спирали прогресса» в долгосрочной перспективе невозможно без эффективного стимулирования инновационных процессов, протекающих в развивающейся системе. Предприятие должно не только создавать новые продукты и технологии, но и быстро осваивать их в производстве, а также продвигать их на внутреннем и мировом рынке. Для этого интеллектуальное предприятие должно активно участвовать в кооперации и интеграции с наукой и образованием. Тесное сотрудничество с научно-исследовательскими институтами и университетами позволит поддерживать экономический рост и конкурентоспособность предприятия на мировых рынках [110].

Вторым важным признаком интеллектуального предприятия является применение эффективных механизмов управления руководителями этого предприятия в практике своей деятельности, которые могут быть названы механизмами умного управления [114]. Под умным управлением понимается способность умных руководителей применять умные методы и механизмы в своей производственной деятельности [115]. По мнению авторов монографии [83], к умным методам управления можно отнести:

1. Стратегические методы формирования приоритетов на определенный период времени.
2. Методы всестороннего анализа динамики показателей работы промышленных предприятий.
3. Методы повышения адаптации промышленного предприятия к постоянно меняющимся условиям хозяйствования.
4. Методы совершенствования производственной логистики.
5. Методы и технологии оценки внешних по отношению к предприятию факторов.

6. Методы формирования современной структуры компании с ее ориентацией на повышение гибкости управления персоналом.
7. Методы и технологии создания информационно-вычислительной структуры предприятия, ориентированные предпочтительно на собственные информационные системы стратегического и оперативного управления.

Кроме умных методов на интеллектуальном предприятии, должны активно применяться умные механизмы с охватом полного цикла управления, которые можно условно разбить на 4 группы [112]:

1. *Неманипулированные механизмы*, позволяющие добиться от работников правдивого отражения своей деятельности.
2. *Согласованные механизмы*, при использовании которых исполнителям становится выгодным выполнять принятые обязательства или планы, т.е. четкое выполнение планов или заданий должно быть наиболее выгодным для работников на любом уровне управления.
3. *Советующие механизмы*, позволяющие продуцировать рекомендации лицу, принимающему решения. Это могут быть компьютерные экспертные системы или группы экспертов, использующие современные механизмы коллективного принятия решений [116]. Для реализации этих механизмов на интеллектуальном предприятии целесообразно создавать специальные ситуационные центры, позволяющие быстро реагировать на возникающие производственные ситуации и осуществлять выбор наилучшего управленческого решения [117].
4. *Развивающие механизмы*, стимулирующие развитие промышленного предприятия (снижение издержек, внедрение инноваций и т.д.). С одной стороны, «противозатратные механизмы» предназначены для борьбы с монополистом. Такие механизмы были разработаны в

рамках теории активных систем [118], основная идея которых заключалась в том, что норматив рентабельности был поставлен в зависимость от себестоимости, т.е. с уменьшением себестоимости норматив увеличивался, но так, что цена продукции при этом уменьшалась. С другой стороны, к снижению затрат предприятия приводят и другие механизмы управления, например, механизмы бережливого производства, теории ограничений или же QRM.

К развивающим механизмам также можно отнести модели управления инновациями, объёмного планирования и оперативного управления производством, модели синхронизации производства, модели транспортных задач и другие.

Третьим важным признаком интеллектуального предприятия является наличие современной информационной системы управления производством, позволяющей собирать, хранить и обрабатывать информацию и знания, необходимые для принятия эффективных решений на всех уровнях управления производственной системы [119]. Информационные системы внедряются на предприятии для автоматизации его бизнес-процессов, которые обычно делят на три взаимосвязанные группы: основные, поддерживающие (обеспечивающие) и управляющие. Отметим, что бизнес-процессы и информационная система предприятия должны соответствовать уровню его организационного развития [3].

На первом этапе развития предприятия в период его становления могут быть автоматизированы только отдельные бизнес-процессы, часто автоматизация носит «лоскутный характер», когда автоматизация носит не комплексный, а локальный характер – различные расчеты, учетные функции, электронный документооборот и т.д. Данный этап развития характерен тем, что отсутствует устоявшаяся модель бизнес-процессов компании, высоким уровнем потерь на стыках процессов и низкой способностью предприятия к развитию – попытки использования новых технологий и инноваций могут

создать на предприятии кризис, а существенные изменения во внешней среде могут привести предприятие к банкротству ввиду отсутствия возможности адаптировать систему управления предприятия к новым условиям [120].

На втором этапе, когда предприятие работает стабильно и сформированы стратегические цели, появляется возможность для улучшений за счет повышения эффективности управления производством и цепями поставок путем внедрения различных передовых технологий, к которым можно отнести Lean Production (бережливое производство), JIT (точно в срок), QRM (быстрореагирующее производство) и другие. На этом этапе автоматизация охватывает практически все основные и поддерживающие бизнес-процессы путем разработки и внедрения автоматизированных систем для планирования производства и управления ресурсами предприятия [121]. Следует отметить, что большинство современных отечественных промышленных предприятий в настоящее время находятся на втором этапе своего организационного развития и активно внедряют информационные системы в производстве с различной степенью успешности. Это связано с тем, что отсутствуют отечественные общепризнанные ERP-системы, удовлетворяющие требования потребителей по важным критериям эффективности [122, 123], а зарубежные ERP-системы дороги и требуют существенных ресурсов на внедрение и сопровождение. Завершением данного этапа развития можно считать комплексную автоматизацию всех бизнес-процессов компании в виде единой информационной системы, которая как правило состоит из множества взаимно-интегрированных модулей, в центре которых находится ERP-система, определяющая модель данных и процессов предприятия.

На третьем этапе организационного развития, которое соответствует интеллектуальному предприятию, появляется необходимость управления не только данными, но и знаниями, для создания уникальных продуктов и

услуг, выходящих за рамки знаний и опыта отдельных руководителей и экспертов [124]. Целью этого этапа является перевод знаний от отдельных индивидов к организации. В результате повышается устойчивость предприятия в настоящем и создаются предпосылки для качественного преобразования предприятия в будущем. Для реализации новых бизнес-процессов управления создаются корпоративные порталы, экспертные системы для анализа бизнеса [125], включая средства многомерного и интеллектуального анализа данных [78], генераторы запросов и отчетов, средства имитационного моделирования производства [126] и цифровые двойники предприятия [86]. На данном этапе резко изменяется роль информационной системы предприятия. Она не только автоматизирует существующие бизнес-процессы, но и позволяет создавать новые возможности для компании, до этого принципиально нереализуемые. И наконец, в наиболее развитом состоянии информационная система, основанная на знаниях, может сама предлагать новые бизнес-процессы, изменяя предприятию бизнес-фокус или даже создавая абсолютно новый бизнес, построенный на инновациях. Тем самым информационная система активно участвует в самоорганизации предприятия, подсказывая руководству наиболее эффективные пути развития, а также берет на себя важную роль в адаптации и обучении персонала, передавая накопленные знания. Это, в свою очередь, обеспечивает поддержание «спирали прогресса» в долгосрочной перспективе и делает предприятие действительно интеллектуальным.

В главе 1 рассмотрены основные инструменты повышения эффективности предприятия, которые могут быть использованы по отдельности или в комплексе для достижения стратегических целей компании. На рисунке 21 представлена сводная диаграмма распределения инструментов и автоматизированных систем управления по уровням управления предприятием. Следует сразу отметить, что предлагаемая

классификация весьма условна и нужна, в первую очередь, для наглядного представления информации. В частности, многие могут не согласиться, что применение принципов Бережливого производства возможно лишь на оперативном уровне.

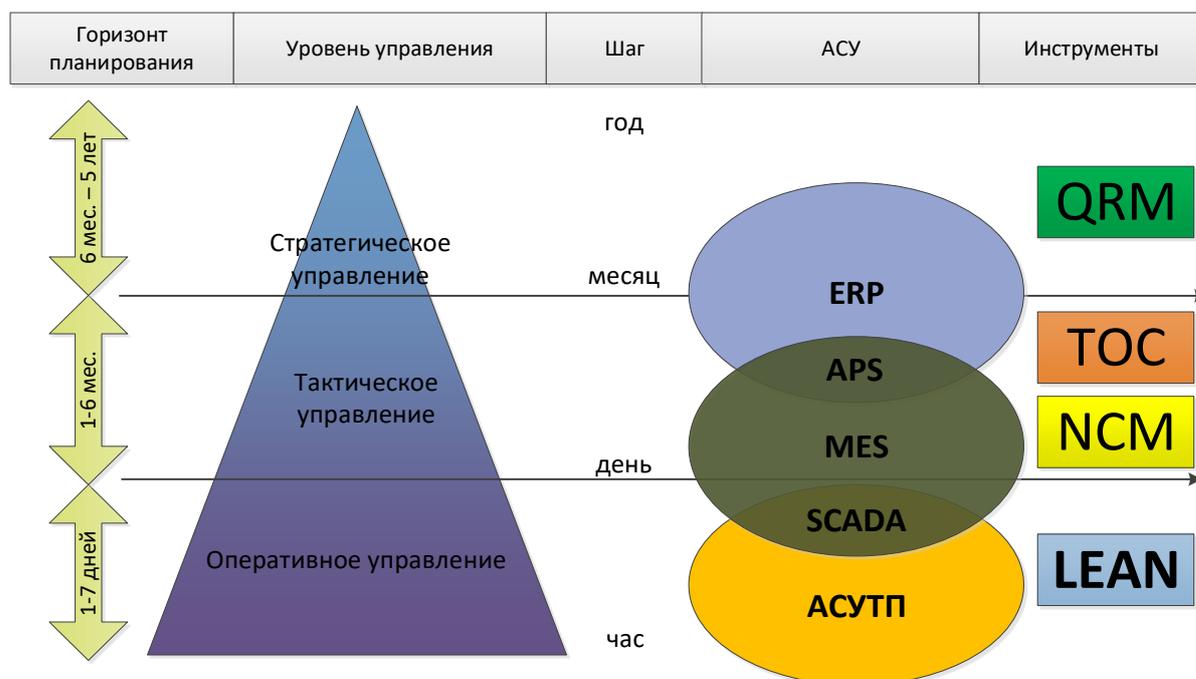


Рисунок 21 – Сводная диаграмма распределения инструментов и автоматизированных систем управления по уровням управления предприятием

2.2. Бизнес-анализ и поддержка принятия решений

Зачастую неотъемлемой частью интеллектуальной системы управления являются знания. Теоретическими и практическими вопросами извлечения, представления и обработки знаний в компьютерных системах занимается направление искусственного интеллекта, называемое инженерией знаний [127, 128].

Одними из основных вопросов инженерии знаний являются:

1. «Какие знания представлять?» - состав знаний, который адекватно отображает моделируемую проблемную область

2. «Как представлять знания?»

а. как организовывать (структурировать) знания

б. как представить знания в выбранном формализме

Основной задачей инженерии знаний является получение и формализация в пригодный для обработки вид знаний Z_0 . При этом возникает естественный вопрос, что такое знания и чем они отличаются от обычных данных.

Основные отличия знаний от данных, сформулированные в работах [129, 130, 131]:

1. Внутренняя интерпретируемость — наличие возможности хранения в памяти совместно с элементом данных «избыточной» системы имён. Современные СУБД позволяют реализовать данное хранение.
2. Рекурсивная структурированность знаний — возможность произвольного установления между отдельными информационными единицами иерархических отношений типа «часть – целое», «род – вид», «элемент – класс».
3. Связность — наличие возможности установления различных отношений, отражающих семантику и прагматику связей отдельных явлений и фактов, а также отношений, отражающих смысл системы в целом. Отношения могут быть как декларативные, так и процедурные. Например, причинно-следственная связь, пространственная связь, функциональная связь и др.
4. Семантическое пространство с метрикой — возможность определять близость/удалённость информационных единиц.

5. Активность — наличие возможности формировать мотивы поведения, ставить цели, строить процедуры их решения. В традиционном подходе данные пассивны, а команды активны. В подходах, основанных на знаниях, появление в базе новых фактов или описаний событий, установление связей могут стать источником активизации системы.

6. И др.

Процесс приобретения знаний согласно [130] состоит из собственно получения знаний (от эксперта или каких-либо других источников) и формализации этих знаний для последующего использования их в информационных системах, основанных на знаниях.

Для решения задач производственного прогнозирования (например, неполадок производственного оборудования, выполнения производственного плана и т.п.) можно воспользоваться методами инженерии знаний для того, чтобы:

1. Корректно извлечь (приобрести) знания из (от) экспертов о том, какие факты и как они могут приводить к тем или иным производственным ситуациям (неисправностям оборудования, срыву плана производства и т.п.).
2. Формализовать знания экспертов для хранения и обработки.
3. Применить методы (например, теорию нечетких множеств) для получения более адекватного (точного) заключения с использованием приобретенных знаний.
4. Спроектировать экспертную систему для создания информационного модуля в рамках системы поддержки принятия решений.

2.2.1 Продукционная модель представления знаний. Графы и деревья

Существуют различные модели представления знаний [132]:

1. *Производственная*. Формирование правил вида «Если-то». Легко хранить и обрабатывать. Представляют в причинно-следственные связи.
2. *Фреймовая*. Сетевой способ представления знаний. Используется при необходимости объединить сценарии (например, поломки оборудования) в некоторую иерархию. Можно производить вычисления, например, за счет присоединённых процедур.
3. *Семантические сети*. Применяются при большом количестве типов отношений между сущностями: иерархические, пространственные, временные, количественные, функциональные и др. Часто используются для представления текста на естественном языке.
4. *Логическая*. Логика предикатов. В первую очередь используются для осуществления процедуры доказательства высказываний.

Предполагается, что для решения задач производственного прогнозирования количество знаний будет относительно небольшим. Знания будут отражать причинно-следственные связи. Поэтому предлагается описывать знания в виде производственных высказываний «Если-то».

В таблице 3 приводится пример совокупности фактов, описывающих состояние производства и приводящих к различным случаям на производстве, требующих принятия тех или иных управленческих решений.

Таблица 3. Пример набора фактов, приводящего к различным случаям на производстве

Случай	Запасы материалов	Запасы ГП	Уровень НЗП	Загрузка рабочих	Загрузка оборудования	% выполнения плана выпуска ГП	% выполнения плана ПФ	Среднее время пролеживания партий

Нормальная работа производства	Средние	Низкие	Средний	Высокая	Высокая	Высокий	Высокий	Среднее
Возник дефицит материалов	Снижаются	Без изменений	Снижается	Снижается	Снижается	Без изменений	Снижается	Снижается
Дефицит трудовых ресурсов	Растут	Снижаются	Снижается	Максимальная	Снижается	Снижается	Снижается	Растет
Дефицит мощностей	Растут	Снижаются	Растет	Снижается	Максимальная	Снижается	Снижается	Растет
Узкие места в производстве	Без изменений	Снижаются	Растет	Неравномерная	Неравномерная	Снижается	Высокий	Неравномерно
Затоваривание складов невостребованной продукцией	Без изменений	Растут	Средний	Высокая	Высокая	Снижается	Высокий	Среднее
Невыполнимый план производства	Снижаются	Низкие	Растет	Высокая	Высокая	Снижается	Снижается	Растет
Производство недогружено	Растут	Низкие	Снижается	Снижается	Снижается	Максимальный	Максимальный	Снижается

При использовании производственной модели представления знаний возможные случаи на производстве можно описать в виде набора правил (продукций). Например:

Если «Запасы материалов» = «Снижаются»

И «Запасы ГП» = «Низкие»

И «Уровень незавершенного производства» = «Растет»

И «Загрузка рабочих» = «Высокая»

И «Загрузка оборудования» = «Высокая»

И «% выполнения плана выпуска ГП» = «Снижается»

И «% выполнения план-факта ПФ» = «Снижается»

И «Среднее время пролеживания партий» = «Растет»

ТО «Случай» = «Невыполнимый план производства».

Для визуального представления производционных правил часто используют И\ИЛИ-граф (см. рисунок 22)

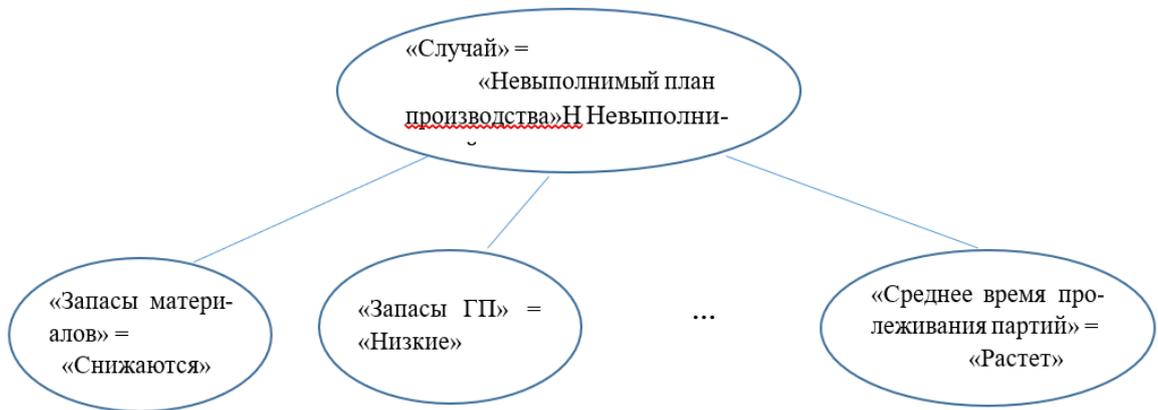


Рисунок 22 – Иллюстрация И\ИЛИ-дерева для одного заключения

Описанные выше правила уже имеют вид дерева принятия решений, т.е. факты однозначно определяют заключение и отсутствуют промежуточные гипотезы. Полный И\ИЛИ-граф в этом случае будет иметь высоту равную единице, что наглядно показывает относительную простоту правил, отсутствие промежуточных гипотез (от факта сразу можно перейти к финальному заключению, как показано на рисунке 23).

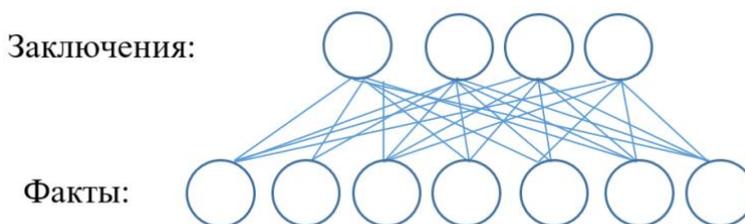


Рисунок 23 – Визуализация простых правил

По мере увеличения объема знаний, детализации знаний и усложнения правил эксперты зачастую вводят промежуточные гипотезы,

таким образом И\ИЛИ-граф может принять более сложный вид, показанный на рисунке 24.

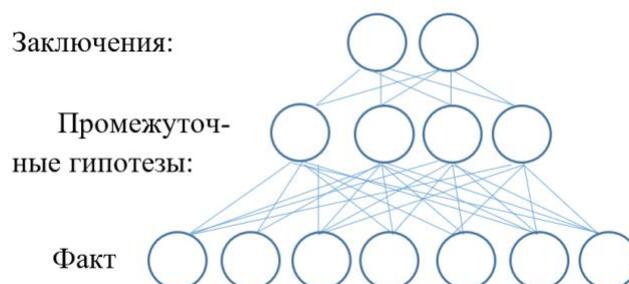


Рисунок 24 – Пример И\ИЛИ-графа с промежуточными гипотезами

На представленном рисунке высота И\ИЛИ графа имеет значение 2. Таким образом И\ИЛИ граф позволяет наглядно отобразить сложность базы знаний, того сколько промежуточных гипотез делает эксперт для формирования конечного заключения.

В таких ситуациях экспертные системы проявляют максимальные положительные свойства. В частности, при увеличении и усложнении знаний не требуется вносить никаких изменений в механизм работы логического вывода и архитектуру ЭС. Можно получить наглядное объяснение сложно выведенной гипотезы при помощи компонента объяснения (какие правила сработали, в какой момент времени, и на основе каких фактов).

Например, в своих суждениях эксперт может использовать факты о состоянии производства для формирования гипотезы о некотором типе производственных проблем (плохое тактическое планирование производства, проблема со сбытом продукции, проблема с оперативным

планированием производства и т.д.), а далее данная типология может учитываться при выводе конкретной прогнозируемой ситуации.

Возможный пример правил с промежуточными гипотезами:

1. **Если** «Запасы ГП» = «Низкие» И «Уровень незавершенного производства» = «Растет» И «% выполнения плана выпуска ГП» = «Снижается» И «Среднее время пролеживания партий» = «Растет»
ТО «Качество планирования на тактическом уровне» = «Низкое»
2. **Если** «Загрузка рабочих» = «Высокая» И «Загрузка оборудования» = «Высокая» И «% выполнения плана выпуска ГП» = «Снижается» И «% выполнения план-факта ПФ» = «Снижается»
ТО «Качество оперативного управления» = «Норма»
3. **Если** «Качество планирования на тактическом уровне» = «Низкое» И «Качество оперативного управления» = «Норма»
ТО «Случай» = «Невыполнимый план производства ГП»

Очевидно, что количество типов производственных проблем и число фиксируемых фактов может быть гораздо больше. Однако это не приведет к принципиальному усложнению построения базы знаний. Сложности при формировании знаний связаны не с количеством правил, а с нечеткостью получаемых от эксперта знаний, связанных с его сомнениями при формулировании требований и отсутствием полной нормативной базы на предприятии. В этом случае может помочь теория нечетких множеств.

2.2.2 Использование теории нечетких множеств для обработки знаний

Выше были приведены знания (продукционные правила), однако при приобретении знаний с использованием эксперта или нескольких экспертов,

может возникнуть множество трудностей (факторов). Данные факторы имеют название «НЕ-факторы».

НЕ-фактором называется некоторое понятие, которое лексически, синтаксически и семантически отрицает какое-либо свойство или аспект знания, как, например, противоречивость (отрицает непротиворечивость знания), неточность (отрицает точность знания) и т. д. [128, 129].

НЕ-факторы можно разделить на 2 типа: автоматизируемые и плохо автоматизируемые. Критерием разделения будет являться возможность извлекать знания из эксперта в автоматизированном режиме при помощи определённых эвристических механизмов:

1. Автоматизируемые:

- a. Нечеткость
- b. Неопределенность
- c. Неточность
- d. Недоопределенность.

2. Не автоматизируемые (плохо автоматизируемые):

- a. Неполнота
- b. Противоречивость
- c. Некорректность
- d. Ненормированность
- e. Немонотонность.

Для устранения проявлений НЕ-факторов типа 2 также используются различные технологии, например, для обнаружения неполноты можно использовать механизмы Data Mining [128, 133].

В дальнейшем для решения задач производственного прогнозирования будут рассмотрены НЕ-факторы 1-го типа. Необходимо

проанализировать их более детально и рассмотреть применимые к ним методы:

1. Нечёткость.

В общем случае нечёткость в знаниях предполагает, что некоторый параметр X является лингвистической переменной, которая может принимать нечёткие значения [134, 135]. Данные особенности будут рассмотрены далее при рассмотрении применимости теории нечетких множеств. При формировании правил эксперт зачастую затрудняется определить точные значения некоторого факта и оперирует неточными значениями. Например, эксперт может оперировать понятием «Сильный рост незавершенного производства».

2. Неопределённость.

При оценке характеристик некоторой проблемы эксперт дополнительно дает оценку точности своего утверждения, или же степень собственной уверенности в некотором суждении. Сама оценка степени уверенности может строиться на еще более сложных суждениях, часть из которых могут носить и вовсе неформализованный вид. Например, «Вероятнее всего сильный рост незавершенного производства». В рамках решаемой задачи неопределённость может применяться как к самим фактам, так и к правилам.

3. Неточность.

При извлечении знаний могут оцениваются некоторые параметры, полученные при помощи расчетов или измерительных приборов, которые имеют свою погрешность вычисления или измерения.

4. Недоопределенность.

Частичное отсутствие знаний о значении какого-либо параметра (измеримого или нет). В случае неопределённости частичное отсутствие знаний можно восполнять, постепенно доопределяя параметр, а неточно измеренные или вычисленные параметры самодостаточны сами по себе.

Под нечетким множеством A понимается совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсального множества X и соответствующих степени принадлежности $\mu_A(x)$

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in X \},$$

причём $\mu_A(x)$ - функция принадлежности, указывающая, в какой степени (мере) элемент x принадлежит нечёткому множеству A .

Рассмотрим пример лингвистической переменной “Высокое значение”. Пусть данный показатель имеет область значений $[-1;1]$. Аппарат нечетких множеств позволяет ответить на вопрос, на сколько значение (в интервале $[-1;1]$) является «Высоким значением».

Тогда можно определить следующую функцию принадлежности, приведенную на рисунке 25:

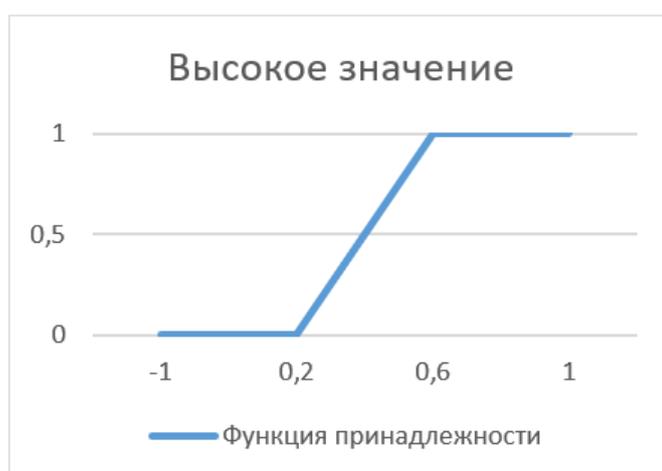


Рисунок 25 – Пример функции принадлежности

В упрощенном виде эту функцию можно интерпретировать следующим образом:

1. Значения показателя меньше 0,2 – точно не высокие значение.
2. Значения показателя от 0,2 до 0,6 линейно приближаются к высокому, т.е. чем выше, тем ближе к тому, чтобы быть определенными как «высокое значение».
3. Значения показателя выше 0,6 – точно высокие.

Важно отметить, что для разных показателей (уровень выполнения плана, загрузка оборудования, уровень незавершенного производства и др.) функции принадлежности могут быть различными. В дальнейшем подобные функции принадлежности необходимо построить для всех лингвистических переменных (показателях производства), которые используют эксперты, например, «Рост загрузки оборудования», «Снижение запаса материалов», «Рост среднего времени пролеживания партий» и др.

Данные функции нужны для того, чтобы преобразовать реальные физические значения в переменные, которыми оперируют эксперты (отражены в знаниях). Функции принадлежности могут корректироваться экспертами со временем. В дальнейшем они будут использованы в процедуре логического вывода.

2.2.3 Формирование и обновление базы знаний

Из знаний (продукционных правил), которые получены от экспертов на основе их предыдущего опыта и интерпретации данных, полученных в течение всего периода функционирования исследуемого производства, формируется база знаний. В дальнейшем, в ходе работы экспертной системы, например, при возникновении непредусмотренных производственных ситуаций, необходимо данную базу знаний пополнять. Общий вид архитектуры экспертной системы приведен на рисунке 26.

Как видно из рисунка 26, в каждой экспертной системе существует отдельный модуль «Компонент получения знаний», с которым, в первую очередь, работает инженер по знаниям. Он может получить знания от экспертов и представить их в выбранном формализме.

Однако при первоначальном формировании базы знаний и дальнейшем ее обновлении необходимо использовать методы для устранения описанных выше «НЕ-факторов». При решении задачи производственного прогнозирования, в первую очередь, необходимо устранить фактор «нечеткость».

Нечеткость необходимо устранять при формировании функций принадлежности. Приведем классификацию существующих методов [136, 40, 137] устранения «нечеткости» и построения функции принадлежности:

1. *Прямые методы для одного эксперта.*

Непосредственное назначение степени принадлежности. Возможный ввод различных шкал (порядковые, интервальные, отношений, и т.д.)

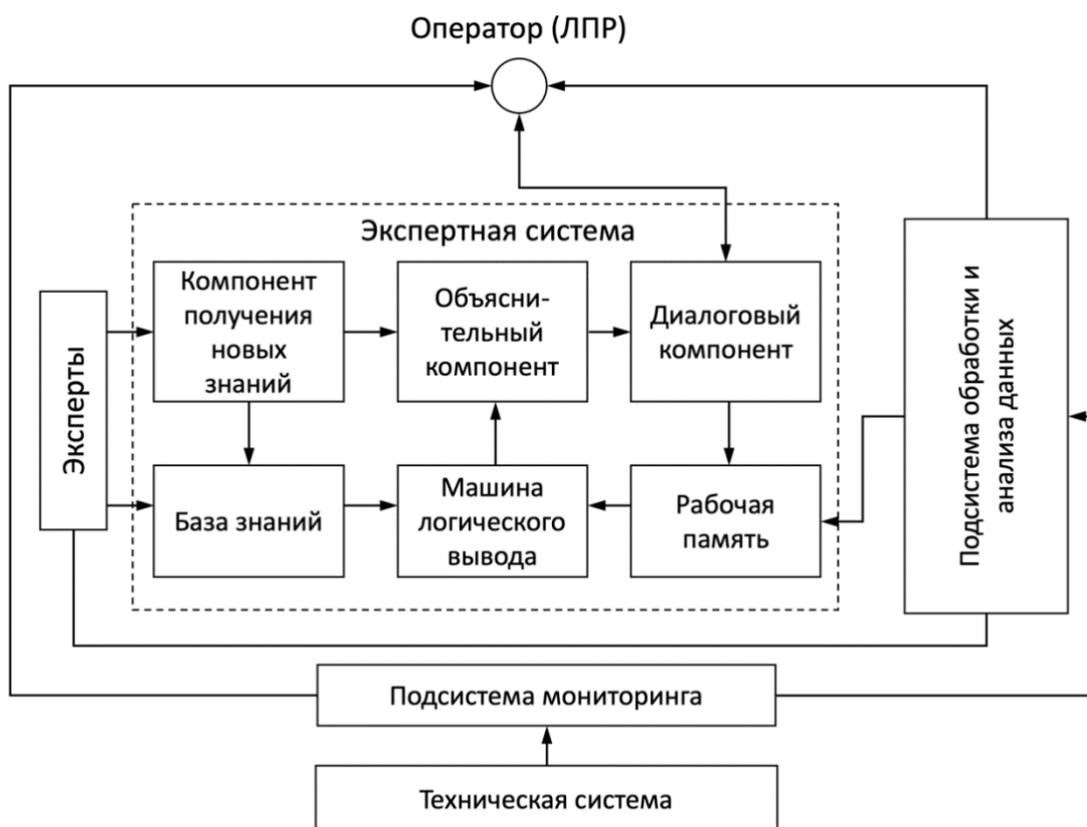


Рисунок 26 – Архитектура экспертной системы, основанной на знаниях

2. *Косвенные методы для одного эксперта.*

Если не существует элементарных измеримых свойств или признаков [136].

3. *Прямые методы для группы экспертов (опросы\голосование и др.)* [137].

4. *Косвенные методы для группы экспертов* [138].

5. *Построение отношения моделирования.*

Составляется таблица с соответствием для лингвистической переменной элементов терм-множеств и объективными значениями в конкретной ситуации.

6. *Использование источников знаний третьего рода.*

Например, на основе накопленной статистики.

7. Параметрический подход к построению функций принадлежности.

Определение неизвестных термов на основе известных.

2.2.4 Алгоритмы логического вывода

Как видно из рисунка 26, в каждой ЭС присутствует компонент «Машина логического вывода», который осуществляет логический вывод с помощью специального алгоритма. Алгоритмы логического вывода можно разделить на два типа [139] (рисунок 27):

1. Прямой (от фактов к заключениям) – для решения задачи прогнозирования производственных ситуаций
2. Обратный (от гипотезы к фактам) – для поиска возможных причин возникновения тех или иных производственных ситуаций.

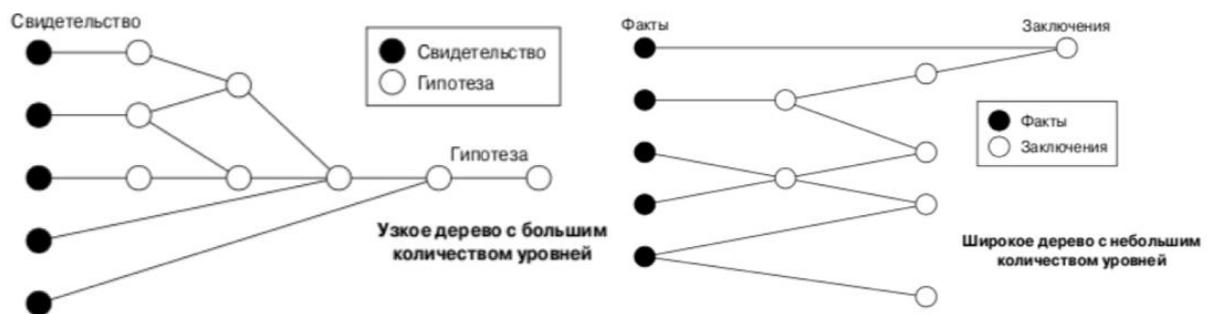


Рисунок 27 – Схемы прямого и обратного логического вывода

Результаты работы обратного логического вывода при наличии большой базы знаний можно использовать при анализе редких нештатных ситуаций, учитывать при моделировании ситуаций, обучении специалистов и др.

Далее рассматривается, в первую очередь, прямой логический вывод, т.к. он чаще используется для решения задач производственного прогнозирования.

В общем виде алгоритм прямого нечеткого логического вывода описывается следующим образом (рисунок 28, рисунок 29):

1. Получение данных и преобразование их в нечеткие множества (fuzzification)
2. Работа механизма (машины) логического вывода, получение заключения

При необходимости преобразование значений из нечеткого множества в вещественные (defuzzification). Данный шаг может отсутствовать, если результат работы логического вывода – обычное значение (не нечеткое).

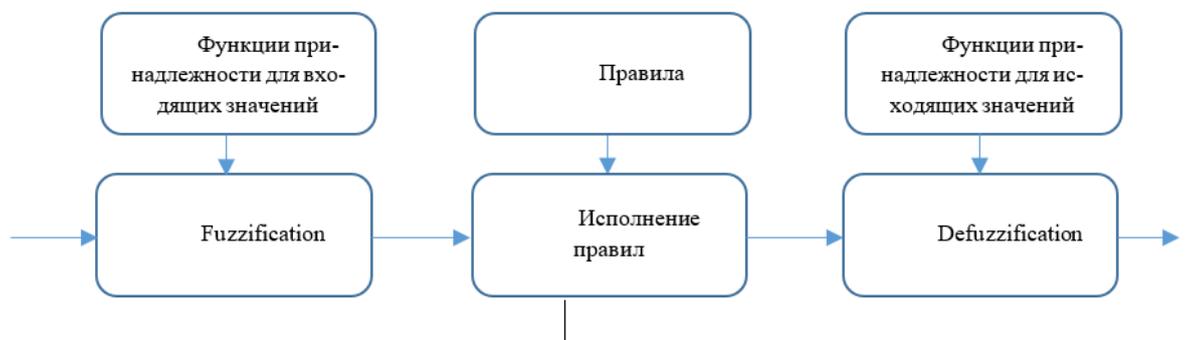


Рисунок 28 – Алгоритм работы нечеткого логического вывода

Исполнение правил осуществляется с помощью машины логического вывода (специальной компьютерной программы), схема работы которой на одном цикле приведена на рисунке 29.

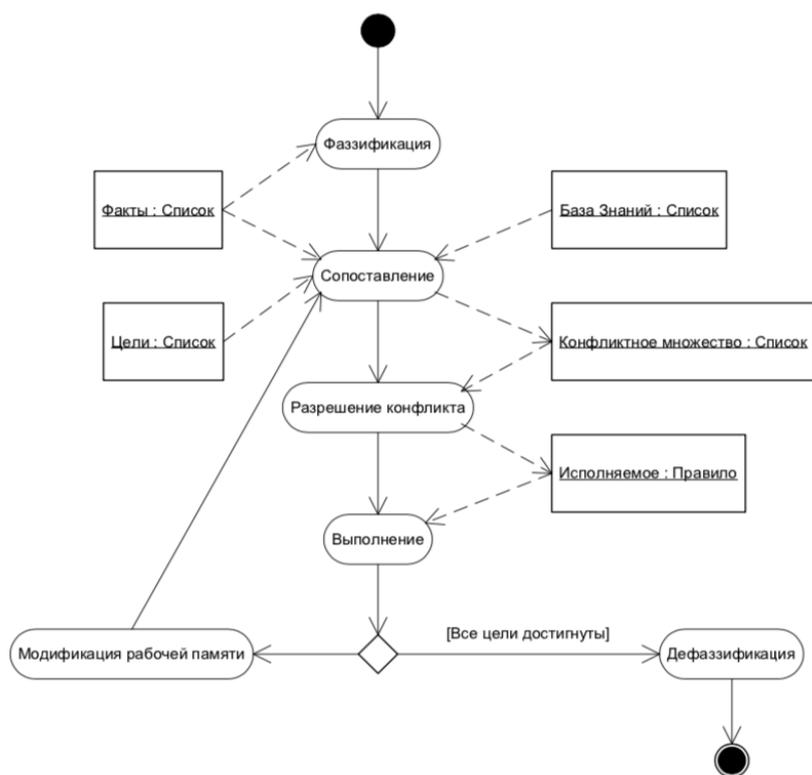


Рисунок 29 – Схема работы машины логического вывода

2.2.5 Пример логического вывода

Рассмотрим конкретный пример нечеткого логического вывода на основе данных, полученных за исследуемый период времени:

1. На вход экспертной системы подается набор данных, полученный в результате работы подсистемы «обработки и анализа данных» в виде набора вещественных чисел в интервале $[-1; 1]$.

Данные значения – не абсолютные значения показателя, а относительные. Каждое число условно можно интерпретировать как относительное значение показателя или как тангенс угла наклона линейного тренда, при отображении показателей в виде двумерного графика по времени в течение заданного периода (см. таблицу 4).

Таблица 4. Пример значений показателей

	Запасы матери алов	Запасы ГП	Уровен ь НЗП	Загрузк а	Загрузк а	% выполн ения	% выполн ения	Средне е время пролеж

				рабочих	оборудования	плана выпуска ГП	плана ПФ	ивания партий
Показатель	- 0.51	0.13	0.55	0.8	0.93	- 0.58	- 0.12	0.32
CF	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

В инженерии знаний часто используется термин – CF (certainty factor, «фактор уверенности», «коэффициент уверенности»). Он может использоваться как совместно с входными данными (фактами), так и в самих правилах логического вывода. На данном шаге CF будет обозначать то, насколько можно доверять входящему значению. Данный коэффициент естественным образом будет учитываться в результате работы логического вывода. Как следствие, полученное заключение тоже будет иметь свой показатель CF.

В рассматриваемом примере показатель «Запасы материалов» имеет коэффициент CF 0.90. Данный коэффициент может быть связан, например, с неуверенностью эксперта в поставке материалов в срок.

2. Преобразование в нечеткие множества (fuzzification).

Применение функций принадлежности, заданных экспертами. Данные функции позволяют получить следующую таблицу 5, на основе входных данных, указанных на предыдущем шаге:

Таблица 5. Пример данных

	Запасы материалов	Запасы ГП	Уровень НЗП	Загрузка рабочих	Загрузка оборудования	% выполнения плана выпуска ГП	% выполнения плана ПФ	Среднее время пролеживания партий
Показатель	Снижается	Низкие	Растет	Высокий	Высокий	Снижается	Постоянно	Растет
CF	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

При обработке данных использовались следующие функции принадлежности (графики, представленные на рисунке 30):

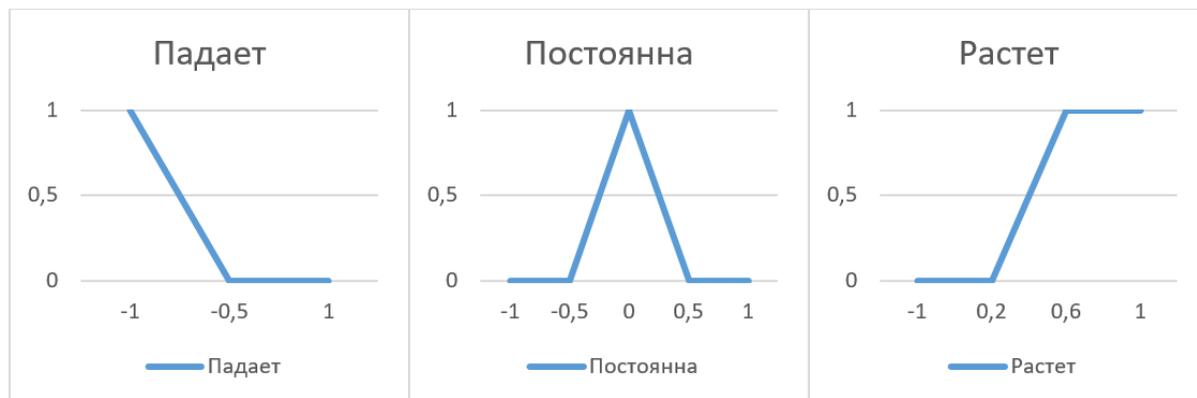


Рисунок 30 – Примеры функций принадлежности

В данном примере для всех показателей используются одинаковые функции принадлежности. При необходимости, можно определить отдельные функции принадлежности для каждого из показателей, что позволит более точно учитывать специфику изменения различных расчетных показателей.

На этом этапе были получены данные, пригодные для использования в продукционных правилах.

3. Факты помещаются в рабочую память. Иницируется работа машины логического вывода (МЛВ). Осуществляется выбор правила, которое может сработать на основании фактов, находящихся в рабочей памяти.

Например, срабатывает правило:

Если «Запасы материалов» = «Снижаются»

И «Запасы ГП» = «Низкие»

И «Уровень незавершенного производства» = «Растет»

И «Загрузка рабочих» = «Высокая»

И «Загрузка оборудования» = «Высокая»

И «% выполнения плана выпуска ГП» = «Снижается»

И «% выполнения план-факта ПФ» = «Снижается или постоянен»

И «Среднее время пролеживания партий» = «Растет»,

ТО «Случай» = «Невыполнимый план производства».

При наличии «коэффициента уверенности» (CF) у фактов и\или у правил, то заключение тоже бы имело соответствующий коэффициент. Например, пусть данное правило имело коэффициент CF равный 0.9.

Т.к. факт «Запасы материалов» имел CF 0.90 и сработавшее правило имело коэффициент 0.9, то в данном случае CF заключения «Случай» будет иметь значение $0.9 * 0.9 = 0.81$ и его можно интерпретировать как «Случай» = «Невыполнимый план производства» с вероятностью 81.0%.

4. После вывода заключения можно запустить «объяснительный компонент» и увидеть какие правила сработали, в какой момент времени, и на основе каких фактов.

В данном примере процедура defuzzification не производилась, т.к. заключение – это обычное значение (не нечеткая переменная). В качестве примера можно ассоциировать с каждой производственной ситуацией некоторый «уровень тревоги» (высокий, средний, низкий). Тогда процедура defuzzification может представлять собой получение вещественного числа из значения «уровень тревоги».

Например, при наличии правила:

Если «Случай» = «Невыполнимый план производства», **ТО** «Уровень тревоги» = «Высокий» и наличии определенной функции принадлежности можно получить число, которое может быть использовано для интеграции с внешними системами. Процедура defuzzification рассмотрена ниже при получении заключения.

2.3. Интеллектуальная система управления

Научное и практическое направление исследований и разработки интеллектуальных систем было сформировано в конце 1989. 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) [140].



Рисунок 31 – 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 [141, 142, 143]. 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. Как уже было сказано в главе 1 объектом исследования является производственная система характерная

для мелкосерийных позаказных производств сложной наукоемкой продукции. Данный вид производственной системы наименее изучен и редко описывается в литературе. Фактически, гипотеза о возможности применения существующих методов оптимизации производства на объекте исследования до сих пор никак не проверялась, исследований на эту тему не обнаружено. По мнению автора именно данный объект исследования может дать наиболее объективные выводы о возможности применения специализированных инструментов для оптимизации различных производственных систем.

2.3. Интеллектуальные элементы

Рассмотрим важнейшую составляющую концепции интеллектуальной системы управления предприятием – интеллектуальные элементы. Будем называть интеллектуальным элементом – механизм, позволяющий в определенных ситуациях частично или полностью заменить собой лицо принимающее решение.

В рамках данной работы, описывается интеллектуальная система управления производством, построенная 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.

На рисунке 32 представлена структурная схема интеллектуальной системы управления производством, точнее одной из возможных реализаций данной концепции.

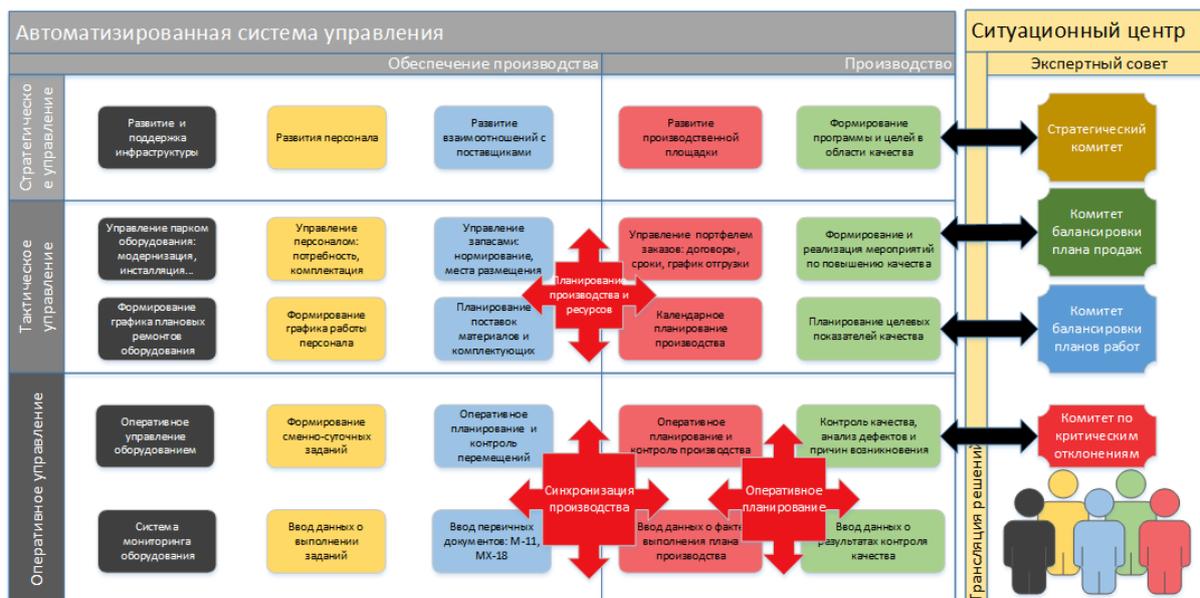


Рисунок 32 – Пример интеллектуальной системы управления производством

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

Кроме того, следует отметить, что решением задачи управления может быть, как единственное решение, так и Парето множество допустимых решений. Как правило, выбор конкретного решения из множества решений задачи – это функция ситуационного центра предприятия, в рамках которого решаются задачи принятия коллективных решений на базе систем поддержки принятия решений.

2.4. Симбиоз автоматизации и рационализации производства

Как уже было сказано в главе 1, развитие автоматизированных систем управления шло параллельно развитию подходов к организации и управлению производством. До сих пор ведутся споры относительно того, какой подход следует выбрать для оптимизации производственных процессов, различные подходы противопоставляются друг другу, приводятся аргументы о несостоятельности тех или иных подходов. Однако следует отметить, что все описанные в главе 1 системы управления и подходы имеют множество успешных внедрений по всему миру, что доказывает эффективность данных подходов по отдельности. На многих предприятиях параллельно внедряются как автоматизированные системы управления, так и принципы бережливого производства или теории ограничений, но ключевое слово здесь – параллельно, т.е. независимо друг от друга.

Между тем использование инструментов быстро реагирующего производства при планировании в ERP системе могло бы привести к сокращению цикла производства продукции; анализ и выявление узких мест и создание буферных запасов деталей при планировании производства – могли бы увеличить пропускную способность производства; автоматизация механизмов потока единичных изделий и системы обратных связей (канбан), позволило бы существенно повысить устойчивость производства и снизить перепроизводство.

Таким образом актуальной представляется задача применения инструментов оптимизации производства в автоматизированных системах управления производством [144]. Данное направление на сегодняшний день малоизучено и недостаточно описано в российской и зарубежной литературе [145, 146].

В рамках данной работы предлагается разработка математических моделей производственных процессов, опирающихся на информационные источники генерируемые и хранимые в автоматизированной системе

управления для решения прикладных задач управления производством с использованием лучших практик оптимизации производства.

В рамках данной работы предлагается использовать знания, накопленные и сформулированные в методиках оптимизации производственных систем для построения интеллектуальных элементов, встраиваемых в интеллектуальную систему управления предприятием, которые возможно бы было использовать на производствах различных типов и при решении различных задач управления производственным предприятием.

Подход к решению данной задачи будет состоять из следующих шагов:

1. Анализ практической проблемы, реально-существующей в объекте исследования.
2. Поиск практических инструментов решения проблемы, описанных для других видов производственных систем (например, массовое поточное производство).
3. Системный анализ выбранных инструментов и попытка применения предлагаемых инструментов подходов при решении тестовых задач.
4. В случае, если на предыдущем этапе будет сделан вывод о невозможности применения подхода при решении проблем объекта исследования будет проводиться попытка адаптировать подход к решению проблемы, сделав его более универсальным.
5. Концептуальная постановка задачи.
6. Математическая постановка задачи.
7. Решение задачи аналитическими или же эвристическими методами.
8. Практическая реализация интеллектуального элемента в виде прототипа модуля, встраиваемого в интеллектуальную систему управления предприятием.

9. Апробация интеллектуального метода на тестовых данных.
10. Опытная эксплуатация интеллектуального элемента на реальном промышленном предприятии.
11. Анализ результатов и подготовка выводов о возможности применения интеллектуального элемента в рамках интеллектуальных системах управления предприятием.

Предполагается, что практическое использование знаний, накопленных в методах оптимизации производства в рамках интеллектуальной системы управления предприятием, позволит значительно повысить эффективность производства и предприятия в целом.

2.5. Открытые внутренние и внешние интерфейсы системы

Наиболее сложной математической моделью интеллектуальной системы управления производственным предприятием является собственно модель производственных процессов предприятия, которая должна учитывать все объективные процессы выполняющиеся на производстве, включая данные о технологических процессах производства продукции, текущей и перспективной информации о производственных мощностях предприятия, текущего и перспективного состояния укомплектованности производства персоналом, информации о текущем и перспективном состоянии обеспеченности материальными ресурсами предприятия (в том числе материалы, инструмент и оснастка, и т.д.).

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.

Приведем примеры задач управления производством:

1. Каким должен быть план поставки материалов, для обеспечения текущего плана производства без простоев и нарушений условий поставки продукции потребителю. В данной постановке план поставки материалов является «вторичным» по отношению к плану производства, и прочим ограничениям производства.
2. Расчет потребности в приеме персонала, для обеспечения выполнения плана производства на период. В данной постановке перспективная укомплектованность персоналом является «вторичной» по отношению к плану производства, и прочим ограничениям производства.
3. Построение календарного плана производства на период, с учетом текущего ограничения по укомплектованности персоналом и планом доступности оборудования. В данной постановке план производства является «вторичной» по отношению к состоянию укомплектованности персоналом, планом доступности оборудования и прочим ограничениям производства.
4. Расчет дефицита мощностей и плана закупки нового оборудования, для обеспечения своевременного выполнения производственной программы на длительный период времени. В данной постановке ограничения по мощностям являются «вторичными» по отношению к плану производства.

Данный список можно продолжать и далее. По большей части, представленные задачи требуют либо построение допустимого решения, либо являются задачами оптимизации. Как правило, задачи поиска допустимого решения, являются задачами оптимизации, с неформализованным должным образом критериями оптимальности. Таким образом, для обеспечения системы управления эффективным механизмом решения целого спектра задач управления, требуется разработка адекватной

модели производственных процессов, а также системы адаптации модели для решения спектра задач оптимизации.

Кроме того, в реальной деятельности предприятия, могут возникнуть некоторые частные и специфические задачи управления, которые невозможно предусмотреть на этапе проектирования, это могут быть как простые расчеты с дополнительными условиями, так и учет дополнительных ограничений, и изменение целей оптимизации.

Все это требует создание нового свойства интеллектуальной системы управления предприятием – открытость интерфейсов ее интеллектуальных элементов. Система должна позволять в процессе эксплуатации вводить новые критерии оптимальности и ограничения при решении задач, которые ранее не были идентифицированы или же просто были неактуальны.

Сформулируем понятие математической модели с открытым интерфейсом следующим образом. 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.

Кроме того, введем понятие модели управления с открытым интерфейсом. Модель управления с открытым интерфейсом – это аналитическое решение и/или комплексный алгоритм, позволяющие решать (находить единственное решение или же Парето множество решений) любую из комбинаций задач, получаемых на основе математической модели с открытым интерфейсом, записанную в следующем виде:

1. пусть определен массив исходных данных, входящих в перечень информационных массивов ММОИ;
2. необходимо определить значения переменных информационного массива входящего в ММОИ (кроме п.1);
3. при выполнении уравнений состояния ММОИ;
4. с учетом произвольного перечня ограничений, входящих в перечень возможных ограничений ММОИ;
5. для обеспечения минимальных значений произвольного перечня критериев оптимальности, входящих в перечень критериев оптимальности ММОИ;
6. с учетом механизма построения комплексных критериев ММОИ;
7. с учетом произвольного количества дополнительных ограничений, построенных в соответствии с системой дополнительных ограничений.

Реализация моделей управления с открытым интерфейсом в интеллектуальной системе управления позволит системе решать в

автоматическом или же в автоматизированном режиме самые различные задачи управления в оперативном режиме, что на порядки повысит оперативность принятия управленческих решений, и качество управленческих решений, за счет использования обоснованных математических моделей и методов оптимизации.

2.6. Ситуационный центр промышленного предприятия

Качество принимаемых руководителями решений в значительной степени определяет эффективность функционирования любой организации, в том числе производственной системы. Повысить качество управленческих решений позволяет механизм коллективного принятия решений [147]. Реализация этого механизма требует разработки соответствующих инструментов, одним из которых может быть ситуационный центр промышленного предприятия (СЦПП), являющийся эффективным инструментом интеллектуализации предприятия [148, 149].

Отметим, что для решения проблем, возникающих в определенной ситуации, авторы работы [113] считают необходимым по крайней мере:

- произвести анализ ситуации, отражающий происходящие в системе изменения;
- выработать последовательность действий (сценарий), направленную на разрешение возникшей проблемы;
- осуществить раскрытие имеющихся неопределенностей;
- выявить перечень ситуационных задач, требующих решения;
- решить ситуационные задачи;
- сформулировать и принять промежуточные решения по отдельным элементам производственной системы;
- сформулировать и принять общее решение по возникшей ситуации.

Как правило, для принятия промежуточных решений по отдельным элементам системы, требуется привлечение широкого круга представителей предприятия (руководителей и специалистов). Также необходимы

математические и информационные модели исследуемых процессов. Авторы различных исследований [82, 78, 79] сходятся во мнении, что целесообразным является разработка методов и алгоритмов поддержки принятия решений для случаев, когда множество возможных альтернатив сложно проанализировать или же когда решения принимаются коллективно.

При исследовании производственной системы, могут быть выявлены наиболее характерные и значимые виды ситуаций, возникающие с определенной регулярностью. Характерные ситуации, могут быть описаны в виде характерных признаков, входных данных и условий возникновения ситуации, а также в виде общей структуры решения, которое необходимо принять для разрешения возникших в результате ситуации проблем. При этом возникает необходимость в разработке общих моделей (алгоритмов) формирования и принятия решений для достижения поставленных целей.

Ситуационный центр может быть также использован для целей обучения и развития персонала компании.

Выводы по главе

На основании всего вышеперечисленного, создание интеллектуальной системы управления производством должно стать следующим этапом развития систем управления производством [140, 83, 112], а применение и объединение лучших практик и подходов к управлению производством имеет потенциал создания синергетического положительного эффекта [150] при практической реализации и внедрении системы. Результаты работы направлены в первую очередь на применения на мелкосерийных машиностроительных предприятиях, производящих сложную (состоящую из тысяч деталей) наукоемкую продукцию, с длительными цепочками технологических этапов и длительными циклами производства. Ожидается, что именно для таких предприятий эффект от внедрения будет

максимальным [119]. Однако предполагается, что использование системы на производствах другого типа также позволит повысить эффективность работы производства, или по крайней мере снизить операционную нагрузку для поддержания системы управления.

Концепция интеллектуальной системы управления для мелкосерийного производства объединяет в себе использование передовых технологий и алгоритмов искусственного интеллекта для оптимизации процессов управления, принятия решений и анализа данных в реальном времени. Эта система включает в себя сбор, анализ и интерпретацию данных, автоматизацию рутинных операций, предсказательную аналитику, а также возможности машинного обучения для улучшения производственных процессов, снижения издержек и повышения эффективности работы предприятия. Концепция базируется на следующих принципах:

1. В качестве базовой системы для построения интеллектуальной системы управления предприятия использовать существующую на предприятии ERP-систему, в которой собраны и унифицированы все основные данные о деятельности компании в соответствии с универсальной моделью данных ERP (справочники, заказы, запасы и т.д.).
2. В рамках существующей информационной системы формируется система управления знаниями (база знаний) с целью перевода знаний от отдельных индивидов к организации.
3. На основании лучших практик оптимизации производственных систем и собственных накопленных знаний предприятия разрабатываются интеллектуальные элементы, способные использоваться как для поддержки процесса принятия решений, так и для автоматического принятия решений в условиях реального производственного процесса.

4. Интеллектуальные элементы интеллектуальной системы управления должны обладать открытыми внутренними и внешними интерфейсами для последующего развития интеллектуальной системы при изменениях во внешней среде.
5. В рамках интеллектуальной системы управления создается ситуационный центр предприятия, способный как поддерживать процесс индивидуального и коллективного принятия решений, так и извлекать экспертный опыт и знания в процессе проработки и принятия решений.
6. Постоянно анализировать принятые решения, осуществлять мониторинг результатов их исполнения и генерировать новые знания на основании накопленных данных и базы знаний.

Практическая реализация и использование интеллектуальной системы управления производственным предприятием позволит перераспределить задачи между уровнями управления и значительно повысить оперативность и эффективность принимаемых решений, сделает управленческую деятельность более сбалансированной и обоснованной. Это позволит предприятиям быстро реагировать на изменения внешней и внутренней среды, оперативно реагировать на возникающие проблемы и обеспечивать высокий уровень эффективности использования ресурсов.

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 позволит 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.

Глава 3. Основные интеллектуальные задачи, решаемые в рамках автоматизированной системы управления производством

Для практической реализации рассматриваемой в данной работе интеллектуальной системы управления выбран объект исследования, потенциал оптимизации процессов в котором, по мнению автора, максимален. Полностью обобщить все задачи управления, которые решаются для всех типов производств не представляется возможным, на эту тему можно провести не одно исследование, но гипотеза о возможности построения полностью универсальной системы управления любым производственным предприятием кажется сомнительной. Для того, чтобы исследование имело практический характер в качестве объекта исследования была рассмотрена производственная система характерная для мелкосерийных позаказных производств сложной наукоемкой продукции.

Объект исследования выбран неслучайно, согласно различным исследованиям [91] такой важнейший показатель эффективности предприятий как производительность труда на таких предприятиях остается крайне низким в сравнении с зарубежными компаниями и российскими предприятиями других отраслей. Также для предприятий такого типа характерно наличие большого числа системных проблем, в частности:

1. Отсутствие детальной системы планирования производства и адекватного учета хода производства.
2. Крайне длительный цикл производства, несопоставимый с суммарным технологическим временем производства (при трудоемкости изделия в 10 000 часов, цикл производства составляет два года и более).
3. Низкий процент выполнения производственных планов (месячные номенклатурные планы могут выполняться на 70% и менее).
4. Частые нарушения контрактных обязательств по срокам поставки готовых изделий.

5. Высокий уровень брака в т.ч.
 - а. Брак, выявляемый на стадии финальной сборки (детали прошли все контроли качества, но при этом являются браком)
 - б. Скрытый брак, который выявляется до предъявления деталей службе качества и исправляется путем выполнения дополнительной обработки.
 - с. Исправимые дефекты, которые фиксируются службой качества и исправляются путем выполнения дополнительной обработки.
6. Высокая себестоимость производства, которая может отличаться в разы от нормативной себестоимости изделий, рассчитанной по нормативам.
7. Низкий коэффициент полезного использования ресурсов:
 - а. Фактическая загрузка оборудования – 50% и ниже.
 - б. Выработка сотрудников – 60% и ниже.
 - с. Низкий коэффициент полезного использования материалов.
8. Высокий уровень потерь в производстве по всем основным показателям.
9. Полная неспособность адекватно реагировать на изменения в портфеле заказов – широко известны случаи, когда после прекращения производства изделия производственные цеха еще в течение шести месяцев продолжали производство деталей к нему.
10. Низкое качество технической документации и нормативно-справочной информации.

Многие из этих проблем, безусловно, имеют объективные причины: изношенный парк оборудования, низкая квалификация рабочих, неоптимальный портфель заказов и т.д. Однако, с подобными проблемами сталкивались и предприятия автомобильной промышленности, что в итоге

привело к возвышению Тойоты и упадку автомобильной отрасли в США. Автомобильная промышленность является ярким, но далеко не единственным примером того, как применение методов оптимизации процессов и изменения системы управления в целом стали решающим фактором решения проблем и повышения конкурентоспособности предприятия.

В рамках данного исследования предполагается, что многие из описанных проблем могут быть полностью или частично решены за счет использования инструментов интеллектуальной системы управления, в частности:

1. Системы календарного планирования производства, способной учитывать все виды ограничений и рассчитывать планы производства, оптимизированные сразу по нескольким критериям, в т.ч. плановая загрузка оборудования и т.д.
2. Модуля синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства.
3. Модуля оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов.
4. Ситуационного центра предприятия, способного обеспечить высокий уровень обоснованности принимаемых решений.

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

3.1. Задача оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала

Постановка задачи

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.

Структура продукта

Считаем, что известна «структура продукта» [56], т.е. состав компонентов продукта, показывающий преобразование сырья и материалов в изготавливаемые компоненты, сборку компонентов в сборочные единицы и т. д. 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. Номенклатурный перечень должен быть отсортирован таким образом, чтобы выполнялись следующие требования:

- вначале перечня располагались изготавливаемые полуфабрикаты

и готовые изделия с номерами $1 \leq i \leq N, N < C$ а затем
закупаемые материалы с номерами $N < i \leq C$;

- элемент с меньшим номером не может входить в состав элемента с большим номером, таким образом, в начале перечня будут готовые изделия, а в конце детали, заготовки и полуфабрикаты.

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

Следует отметить, что матрица **A** обладает следующими свойствами:

- элементы главной диагонали матрицы **A** всегда равны нулю, элемент не может состоять сам из себя.
- Если $a_{ij} \neq 0 \Rightarrow a_{ji} = 0$, где $j \in \overline{1, N}, i \in \overline{1, N}$, если компонент 1 входит в состав компонента 2, следовательно, в состав компонента 1 не может входить компонент 2 (исключение цикличности).
- $a_{ij} = 0$, для всех $j \geq i$, где $j \in \overline{1, N}, i \in \overline{1, N}$, это свойство следует из двух предыдущих свойств, а также из особенностей сортировки номенклатурного справочника.

Таким образом, матрица **A** всегда представлена в следующем виде:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N-1} & a_{N-2} & \dots & a_{N-1} & 0 \\ a_{N+1 \leftrightarrow 1} & a_{N+1 \leftrightarrow 2} & \dots & a_{N+1 \leftrightarrow N-1} & a_{N+1 \leftrightarrow N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{C \leftrightarrow 1} & a_{C \leftrightarrow 2} & \dots & a_{C \leftrightarrow N-1} & a_{C \leftrightarrow N} \end{bmatrix}.$$

Технологические процессы

Технологические процессы, описывающие способ производства

каждой изготавливаемой номенклатурной единицы, считаются заданными [22].

ГКПП

Главный календарный план производства описывает план, исходя из номенклатурных позиций независимого спроса (что производить, когда производить, сколько производить) [151]. В соответствии со сказанным выше, ГКПП задается в виде матрицы g . Ее элементы g_{id}^z определяют количество номенклатурных единиц (компонентов) с номерами $i \in \overline{1, N}$ и номером заказа $z \in \overline{1, Z}$, которые необходимо произвести до дня с номером $d \in \overline{1, T}$, где T – количество дней в плановом периоде. Введем приоритет заказа $\sigma_z \in \overline{0, 1}$. Таким образом, в данном случае ГКПП – это портфель заказов. Портфель заказов – это набор продукции, для производства в течение следующего планового периода.

Без нарушения общности предполагается, что предприятие работает в одну смену. Если предприятие работает в две или три смены, то T будет обозначать количество смен в плановом периоде. Также, из вида матрицы следует, что при составлении ГКПП учитывается приоритет каждого заказа.

Суть ГКПП: определить продукцию, которую необходимо произвести в течение планового периода, и сроки ее изготовления. Позиции ГКПП подлежат дальнейшему разузлованию с помощью матрицы A для определения потребности в каждом отдельном компоненте структуры продукта. ГКПП является для задачи входным параметром [152].

Как уже отмечалось выше, ГКПП подлежит разузлованию, т.е. определению компонентов, которые необходимо произвести в плановом периоде, а также материалов, которые для этого потребуются.

План поставок

Пусть известны планируемые остатки компонентов на складах предприятия на начало периода, а также план поставок компонентов на

склады предприятия в течение планового периода, при этом считаем, что компоненты на складах могут быть как *свободными* (т.е. могут быть использованы для производства любого заказа), так и *зарезервированными* под конкретный заказ. Таким образом, 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 , $i \in \overline{1, C}$, $d \in \overline{1, T}$, значение индекса $z = 0$ означает, что остаток, либо планируемая поставка являются *свободной*.

Расчет потребности

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:

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

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

Технологические операции

Технологическая операция содержит информацию о рабочем центре, на котором она должна быть совершена, а также нормы времени для подготовки и обработки. 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 $i \in \overline{1, N}$.

Вид операции определяется следующим набором данных: номер операции, номер номенклатурной единицы, тип рабочего центра, трудоемкость. Следует отметить, что при таком определении виды

операций, выполняемые технически эквивалентно на одном и том же оборудовании, но для разных номенклатурных единиц, считаются различными. Поэтому общее количество видов операций можно определить по формуле

$$W = \sum_{i=1}^N w_i. \quad (2)$$

Виды операций по каждой номенклатурной позиции пронумеруем индексом $l \in \overline{1, w_i}, i \in \overline{1, N}$.

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

Для каждой операции определена трудоемкость, в данной задаче имеющая смысл времени, которое тратит рабочий центр на совершение соответствующей операции. Из данного параметра будет рассчитываться загрузка оборудования, и длительность операций технологического этапа при планировании. 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, $i \in \overline{1, N}$.

Незавершенное производство

В условиях реального производства на начало любого периода в производстве находится определенное количество деталей и полуфабрикатов с незаконченным производственным циклом. Ввиду того, что технологический процесс производства по ним не закончен, они не могут быть сданы на склад готовой продукции. При этом в рамках данной модели считается, что списанием материалов и комплектующих для

изготовления компонентов уже сделаны, в момент запуска в производство. Таким образом, в производстве находится определенное количество незавершенных деталей разных видов, в разной степени готовности. Для описания незавершенного производства на начало периода, введем матрицу f_{il}^z , $l \in \overline{1, w_l}$, $i \in \overline{1, N}$ которая определяет количество операций l -го вида для каждого заказа, завершающихся 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:

$$o_{il}^z = \begin{cases} n_i^z - f_{il}^z, n_i^z - f_{il}^z > 0 \\ 0, n_i^z - f_{il}^z \leq 0 \end{cases}, \text{ где } l \in \overline{1, w_l}, i \in \overline{1, N} \quad (3)$$

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).

Производство

В соответствии с вышеизложенными рассуждениями, процесс производства продукции представляется последовательностью технологических операций в цехах и переходах между цехами. Известен общий объем операций, который необходимо оптимальным образом распределить по рабочим сменам и рабочим центрам при соблюдении имеющихся ограничений. В этом и заключается задача планирования производства на тактическом уровне.

Математическая постановка

Для описания плана производства введем матрицу P . Ее элементы p_{ila}^z определяют количество операций l -го вида по i -ой номенклатурной позиции, по каждому заказу z с номером $z \in \overline{1, Z}$, запланированных на день

с номером d , $l \in \overline{1, w_l}$, $i \in \overline{1, N}$, $d \in \overline{1, T}$, где T – количество дней в плановом периоде, т.е. без нарушения общности предполагается, что предприятие работает в одну смену. Если предприятие работает в две или три смены, то T будет обозначать количество смен в плановом периоде. Введем булевый вектор α^z , определяющий взятие или не взятие конкретного заказа. Фактически матрица P является календарным планом производства, с детализацией до операции и заказа. Таким образом, решением задачи будет определение элементов p_{ild}^z и вектора α .

Введем матрицу баланса номенклатурных единиц B . Ее элементы b_{id} определяют количество номенклатурных единиц с номерами $i \in \overline{1, C}$, находящихся на цеховых складах на конец дня с номером $d \in \overline{1, T}$, значение индекса $d = 0$ используется в матрице баланса для определения остатков номенклатурных единиц на начало планируемого периода. Очевидно, что значения матрицы напрямую зависят от плана производства P и от плана поставок r . Отметим, что эта матрица зависит от ГКПП – в дни, когда запланирован выпуск продукции, происходит автоматическая отгрузка готовой продукции со склада. Элементы матрицы B можно определить следующим образом:

$$b_{id} = \begin{cases} \sum_z r_{id}^z, i \in \overline{1, C}, d = 0 \\ b_{id-1} + \sum_z p_{i, w_l-1, d}^z + \sum_z r_{id}^z - \sum_z \alpha^z \cdot g_{id}^z - \sum_z \sum_{j=1}^N p_{j, 1, d}^z a_{ij}, i \in \overline{1, N}, d \in \overline{1, T}, \\ b_{id-1} + \sum_z r_{id}^z - \sum_z \sum_{j=1}^N p_{j, 1, d}^z a_{ij}, N < i \leq C, d \in \overline{1, T} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь учтено предположение о том, что произведенное количество i -ой номенклатурной единицы совпадает с количеством выполнений последней операции i -го технологического этапа. Компоненты используются тогда, когда выполняется первая технологическая операция.

Очевидно, что при составлении календарного плана производства должны учитываться следующие ограничения:

1. Суммарное количество операций одного вида по заказам, в календарном плане должно быть равно общему количеству операций данного вида, которые необходимо выполнить в плановом периоде по данному заказу, с учетом формирования портфеля принятых к производству заказов. Математически данное ограничение может быть представлено в следующем виде

$$\sum_{d=1}^T p_{ild}^z = o_{il}^z \alpha_z, \text{ где } \alpha = |\alpha_1, \dots, \alpha_z|; \alpha_z = \begin{cases} 0, & \text{не входит} \\ 1, & \text{входит} \end{cases}, z \in \overline{1, Z} \quad (5)$$

Данное ограничение также показывает, что существует возможность не взять заказ.

2. В каждый из планируемых дней, максимальная загрузка рабочих центров не должна превышать максимально возможную загрузку рабочих центров в этот день. Математически данное ограничение может быть представлено в следующем виде

$$\sum_{i=1}^N \sum_z \sum_{l=1}^{w_i} p_{ild}^z t_{il}^z \beta_{lk}^z \leq t_k^* q_{kd}, \text{ где } d \in \overline{1, T}, \beta_{lk}^z = \begin{cases} 1, & e_{il}^z = k \\ 0, & e_{il}^z \neq k \end{cases}, l \in \overline{1, w_i}, k \in \overline{1, E}, z \in \overline{1, Z} \quad (6)$$

3. В любой момент времени остаток номенклатурных единиц не может быть отрицательным. Все детали должны быть отгружены в срок, т.е. к моменту, запланированному в ГКПП на складе должны быть остатки. Математически данное ограничение может быть представлено в следующем виде

$$b_{id} \geq 0, \text{ где } i \in \overline{1, C}, d \in \overline{0, T} \quad (7)$$

4. Производство любого заказа должно выполняться по строго заданному технологическому маршруту. Все операции должны выполняться в определенной последовательности. Математически данное ограничение может быть представлено в следующем виде

$$\forall d^*: \sum_{d=1}^{d^*} P_{idl}^z + f_{il}^z \geq \sum_{d=1}^{d^*} P_{id+1} + f_{il+1}^z, i \in \overline{1, N}, d \in \overline{1, d^*}, l \in \overline{1, w_i}, z \in \overline{1, Z} \quad (8)$$

Критерии оптимальности календарного плана производства

Введем четыре основных критерия оптимальности календарного плана производства:

1. Критерий комфортности производства, т.е. календарный план производства должен быть скомпонован таким образом, что операции одного вида запускаются в производство как можно большими партиями, таким образом, переналадка оборудования не потребуется при переходе от совершения одной операции к другой. Математически данный критерий может быть представлен в следующем виде:

$$J_1 = \sum_z \sum_{l=1}^{w_l} \sum_{d=1}^T \beta_{ld}^z \rightarrow \min, \text{ где } \beta_{ld}^z = \begin{cases} 1, p_{ld}^z \neq 0 \\ 0, p_{ld}^z = 0 \end{cases}, z \in \overline{1, Z} \quad (9)$$

В приведенном критерии учтено вполне очевидное утверждение о том, что чем большими партиями операции одного вида будут запускаться в производство, тем меньше будет ненулевых элементов p_{ld}^z матрицы P , образно говоря, план будет нарезан большими кусочками, и тем меньше, следовательно, будет сумма булевых переменных β_{ld}^z .

2. Производство должно быть равномерным, т.е. нагрузка на рабочие центры должна быть распределена таким образом, чтобы загрузка рабочих центров в течение планового периода изменялась постепенно, без резких перепадов. Математически данный критерий может быть представлен в следующем виде:

$$J_2 = \sum_{d=1}^{T-1} \sum_{k=1}^E |\theta_{kd} - \theta_{kd+1}| \rightarrow \min, \text{ где } \theta_{kd} = \frac{\sum_{l=1}^N \sum_z \sum_{i=1}^{w_i} p_{ild}^z t_{ik}^z \beta_{ld}^z}{t_k q_{kd}}, \beta_{ik}^z = \begin{cases} 1, e_{il}^z = k \\ 0, e_{il}^z \neq k \end{cases}, z \in \overline{1, Z} \quad (10)$$

3. Срок изготовления ГКПП должен быть минимальным. При этом ГКПП считается выполненным только в том случае, если все операции

завершены, т.е. дата совершения последней операции и будет являться сроком исполнения всего ГКПП. Математически данный критерий может быть представлен в следующем виде:

$$J_3 = \max_{d \in \overline{1, T}} \omega(d) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где

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

4. Производство должно выполнять максимальное количество приоритетных заказов. Математически данный критерий может быть представлен в следующем виде

$$J_4 = \sum_{z=1}^Z \sigma_z \alpha_z \rightarrow \max, \text{ где } \alpha = |\alpha_1, \dots, \alpha_z|; \alpha_z = \begin{cases} 0, \text{ не входит} \\ 1, \text{ входит} \end{cases}, \sigma_z = \overline{0, 1}; \quad (12)$$

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

Для того чтобы задача была разрешимой, требуется ввести обобщенный критерий оптимальности плана. При этом на практике обычно один из критериев выбирают как «главный», то есть имеющий наивысшую важность. Однако все эксперты сходятся во мнении, что про другие критерии также нельзя забывать, все они имеют важность. Однако соотношение важности этих критериев весьма нечетко. Таким образом, предлагается ввести обобщенный критерий, который будет учитывать главный критерий как основной, и все остальные, как вспомогательные критерии, о которых нельзя забывать.

В качестве обобщенного критерия выбора введем нечеткое множество $J^r = \{(\mu_1, J_1) \quad (\mu_2, J_2) \quad (\mu_3, J_3) \quad (\mu_4, J_4)\}$, где $\mu_i \in [0; 1]$, элементами носителя которого являются значения частных показателей J_k^{\square} , а важности этих показателей, равные $\mu_k, i \in \overline{1, 4}$, определяют соответствующие функции принадлежности. При этом для сравнения альтернатив по значениям

обобщенного критерия необходимо ввести специальный индекс ранжирования. Необходимость введения такого индекса обусловлена тем, что, во-первых, различные показатели качества объектов производственной системы могут иметь различную физическую природу и, как следствие, различную размерность, которая нивелируется введением безразмерной величины C_i (i – номер соответствующего показателя), а во-вторых, этот индекс учитывает только те показатели, которые являются определяющими при обобщенной оценке качества. Подробно процедура введения такого индекса ранжирования рассмотрена в работе [30].

Теперь, используя четкую функцию от нечеткого аргумента $H(J^{r1}, J^{r2})$ (специальный индекс ранжирования), можно записать:

$$H(J^{r1}, J^{r2}) = \text{sign } C_i, \text{ где } C_i = \frac{\mu_i^{r1} \cdot J_i^{r1} - \mu_i^{r1} J_i^{r2}}{\max(J_i^{r1}, J_i^{r2})}, \quad (13)$$

$$i - \text{ доставляет } \max \left| \mu_i \frac{J_i^{r1} - J_i^{r2}}{\max(J_i^{r1}, J_i^{r2})} \right|$$

Если значение i единственное результаты сравнения определяются по следующему алгоритму:

1. $J_i^{r1} > J_i^{r2}$, если $\text{sign } C_i = "+"$.
2. $J_i^{r1} < J_i^{r2}$, если $\text{sign } C_i = "-"$.

Если значение i не единственное то необходимо дополнительно вычислить $\lambda = \sum_{i=1}^k \text{sign } C_i$ и определить результаты сравнения:

1. $J_i^{r1} = J_i^{r2}$, если $\lambda=0$.
2. $J_i^{r1} < J_i^{r2}$, если $\lambda < 0$.
3. $J_i^{r1} > J_i^{r2}$, если $\lambda > 0$.

На основании предложенного обобщенного критерия оптимальности все допустимые решения могут быть сравнены между собой. В общем случае, в

результате сравнения всех возможных решений будет получено Парето множество оптимальных решений, для которых $J_i^{r1} = J_i^{r2}$. В случае, если решение не единственное необходимо дополнительная процедура принятия решения о выборе варианта плана производства, для этих целей будет предложена дополнительная процедура принятия индивидуальных и коллективных решений в рамках ситуационного центра предприятия.

3.2. Задача синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства

В статье [21] дается последовательное обоснование того, что ERP-система является выталкивающей системой управления, что означает организацию движения материальных потоков через производственную систему, при которой материальные ресурсы подаются с предыдущей операции на последующую в соответствии с заранее сформированным жестким графиком поставок. Материальные ресурсы «выталкиваются» с одного звена производственной логистической системы на другое. Каждой операции общим расписанием устанавливается время, к которому она должна быть завершена. Полученный продукт «проталкивается» дальше и становится запасом незавершенного производства на входе следующей операции. Рассчитанный план является обязательным для исполнения производством, если на этапе сборки изделий возникнет серьезная проблема, не позволяющая длительное время производить определенный вид продукции, ERP-система не остановит заготовительное производство по данному заказу, что далее приведет к производству невостребованных деталей незавершенного производства, загрузке мощностей невостребованной продукцией и т.д. Пересчет графика производства продукции происходит достаточно редко (занимает длительное время, требует подведения итогов и вызывает организационные проблемы), что не позволяет с помощью пересчета добиться постоянно актуального плана

производства. На практике постоянные отклонения, возникающие в производстве, приводят производство под управлением ERP-системы в состояние, при котором уровень незавершенного производства постоянно увеличивается, срывы сроков становятся все более частыми. При этом, оборудование постоянно простаивает ввиду отсутствия нужных деталей для обработки. Элементы системы (производственные подразделения) живут своей жизнью (выполняют рассчитанный план) без учета отклонений, возникающих в других элементах системы.

В различных источниках, посвященных практике внедрения бережливого производства, теории ограничений и быстро реагирующего производства, подробно представлены обоснования того, что выталкивающие системы, сталкиваясь с постоянными отклонениями и не имея внутренних механизмов для контроля отклонений, быстро увеличивают уровень незавершенного производства, производят невостребованную продукцию и несут другие потери.

В противовес выталкивающей системе приводится понятие «вытягивающей» логистической системы, т.е. такой организации движения материальных потоков, при которой материальные ресурсы подаются («вытягиваются») на следующую технологическую операцию с предыдущей по мере *необходимости*, поэтому жесткий график движения материальных потоков отсутствует. Существует и более простое определение, система вытягивания – это система управления производством, объем запасов в которой определенным образом ограничен [20].

В литературе по бережливому производству описаны следующие виды вытягивающего производства [20], которые хорошо себя зарекомендовали в крупносерийном производстве:

- Восполнение супермаркета
- Лимитированные очереди ФИФО

- Барабан-Буфер-Веревка
- Лимит НЗП



Рисунок 33 – Принцип работы супермаркета

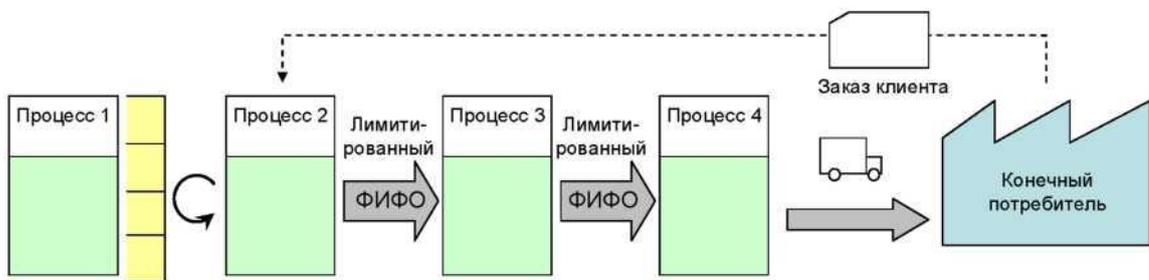


Рисунок 34 – Принцип работы лимитирующей очереди ФИФО

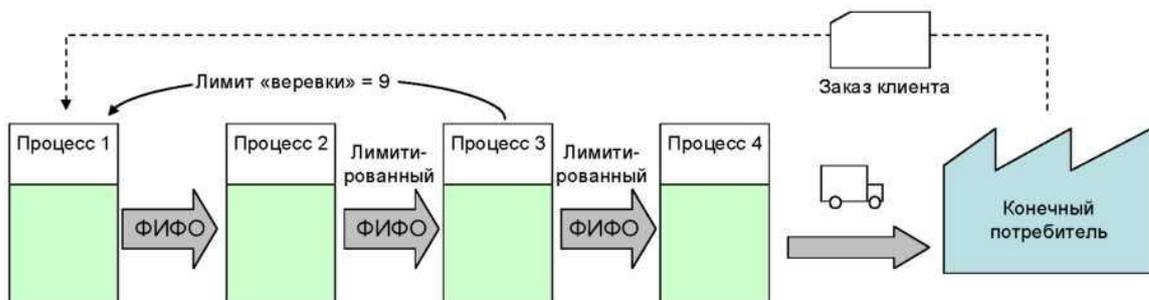


Рисунок 35 – Принцип работы метода Барабан-Буфер-Веревка

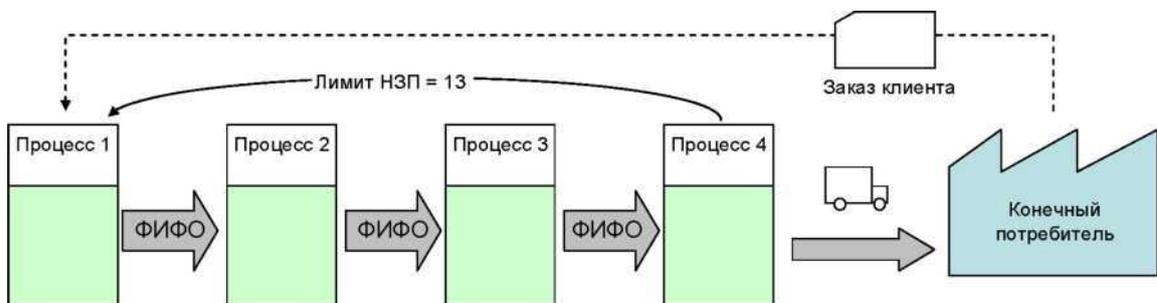


Рисунок 36 – Принцип работы лимитирования НЗП

В быстрореагирующем производстве предлагается система контроля POLCA (накладывающиеся друг на друга циклы взаимодействия попарно соединенных ячеек при помощи карточек и авторизации, *paired-cell overlapping loops of cards with authorization*), разработанная для применения на мелкосерийных производствах, организованных по принципам QRM, которая с одной стороны использует план рассчитанный в ERP системе для определения объема работ и циркулирующие карточки пар ячеек, находящихся в единой цепочке работ. Задача карточек аналогична супермаркету, но адаптированному для мелкосерийного производства. Если производственное подразделение (цех, ячейка, рабочий центр) не имеет карточки от потребителя, то оно не может выполнять работы, а когда есть карточка, то подразделение выполняет план из ERP системы.

Описанные выше методы реализуются в производстве либо без использования автоматизированной системы, либо, используя ее как источник информации о следующих работах. Описанные способы организации вытягивающего производства являются частными случаями организации производства (крупносерийное производство или цепочка производственных ячеек).

Постановка задачи

В качестве объекта исследования рассмотрим мелкосерийное дискретное универсальное производство с широким спектром высокономенклатурной разнообразной продукции.

Производство организовано в нескольких цехах $n \in \overline{1, N}$, где N – общее количество цехов, которые, в свою очередь, разделены на производственные участки $k \in \overline{1, K}$, где K – количество участков во всех цехах, на которых сосредоточено определенное количество технологического оборудования, объединённого либо по типу выполняемых технологических операций, либо по принципу формирования ячейки QRM [27]. При этом, для обеспечения управляемости, размер

участков не слишком велик в масштабах производства. Введем принадлежность участка цеху с помощью $n_k, k \in \overline{1, K}$ – номер цеха, в котором находится участок.

На рисунке 37 представлен пример организации производства и деления на участки, а также стрелками обозначены основные направления движения материального потока, образующие технологические цепочки на производстве. Анализ технологических цепочек крайне важен для построения эффективного процесса производства и для синхронизации производства, в частности [153, 154].

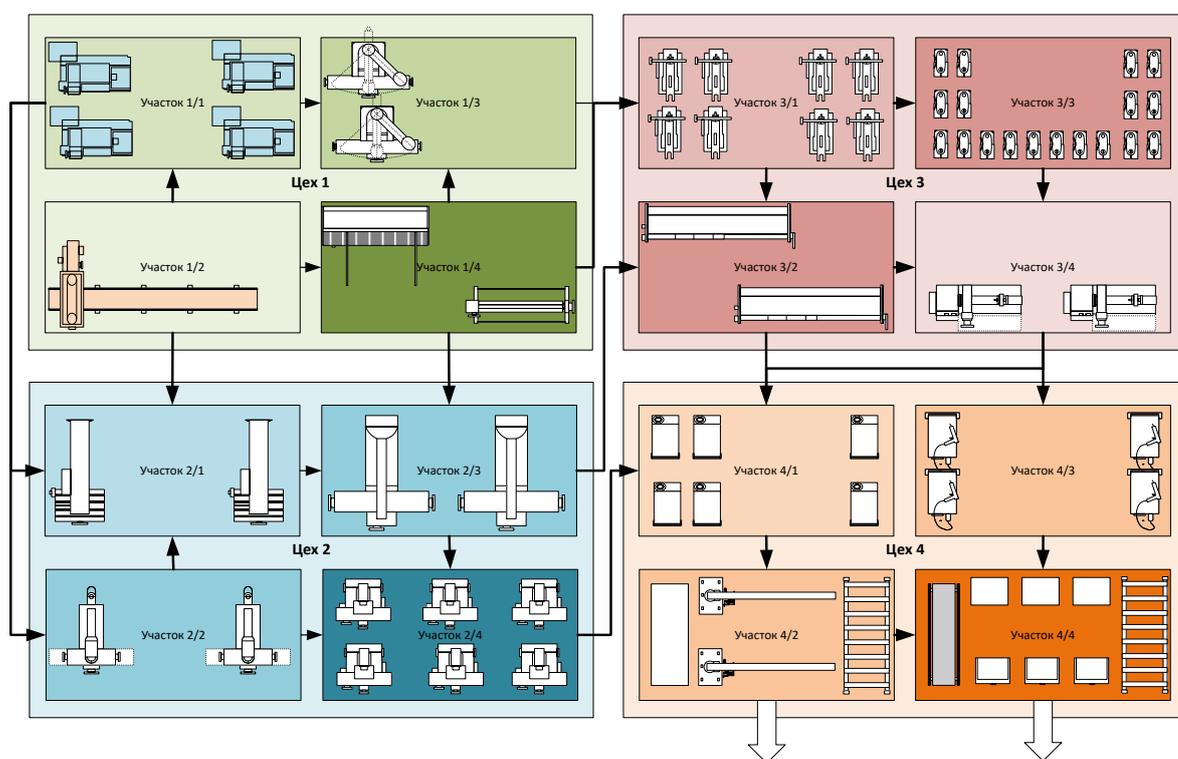


Рисунок 37 – Пример организации производства и деления на участки

Считается, что на предприятии внедрена автоматизированная система управления предприятием, построенная на стандартной для MRP II модели данных [56]:

- Заданы ресурсные спецификации на изделия и полуфабрикаты.

- Заданы технологические маршруты изготовления, содержащие как минимум маршрут обработки деталей и сборок по участкам и расширяемые перечнем технологических операций с указанием трудоемкости и используемого оборудования.
- Введены календарные нормативы длительности маршрутных переходов.
- Сформирован Главный Календарный План Производства, определяющий потребность в выпуске продукции по датам потребности, разделенный по заказам клиента и по партиям выпуска продукции внутри заказа.
- Производство деталей и сборок осуществляется партиями, размер которых определяется в ERP-системе, партии пронумерованы индексом $p, p \in \overline{1, P}$.
- Для каждой партии известен маршрут обработки. Известно количество маршрутных переходов для каждой партии – m_p , для каждого маршрутного перехода определен номер участка исполнителя $M_{mp}, m \in \overline{1, m_p}, p \in \overline{1, P}$.
- Партии деталей движутся в производстве строго по маршруту, передача партии деталей с участка на участок осуществляется дискретно.
- В каждый момент времени известно текущее состояние незавершенного производства. Для каждой партии деталей, определен текущий маршрутный переход $C_p \in \overline{0, m_p}$, где значение 0 соответствует состоянию завершения обработки партии деталей.
- Партия деталей переходит на следующий этап обработки сразу же после завершения обработки на предыдущем этапе, после завершения выполнения последнего этапа текущее состояние

автоматически переходит в состояние 0, при этом значение текущего перехода изменится согласно формуле (1):

$$C_p^* = \begin{cases} M_{C_{p+1} p}, C_p < m_p \\ 0, C_p = m_p \end{cases} \quad (14)$$

- Для текущего состояния незавершенного производства определены дополнительные дискретные состояния $S_p \in \{0,1,2,3,4\}$, где 0 – партия находится в стадии транспортировки или комплектования; 1 – партия находится на участке, обеспечена ресурсами и готова к обработке; 2 – партия определена к выполнению; 3 – начата обработка партии; 4 – завершена обработка партии на участке.
- Следует отметить, что перевод статуса партии в следующее состояние является необратимым, перевод партии в предыдущее состояние невозможен.
- Для более детального учета в ERP-системе могут быть выделены дополнительные статусы текущего состояния, такие как: ожидание поступления, ожидание начала обработки, начата обработка и т.д.
- Для каждой партии определен *приоритет заказа*, содержащий агрегированную информацию о важности заказа клиента, прибыльности, стоимости и прочих параметрах заказа, влияющих на важность заказа для предприятия $W_p \in [0,1]$, где единице соответствуют максимальные значения важности заказа.
- Рассчитан календарный план производства, определяющий для каждого пункта маршрута обработки каждой партии деталей плановые даты начала обработки DP_{mp} , плановую длительность обработки DL_{mp} и фактическую дату начала DF_{mp} обработки партий деталей на участках, где $m \in \overline{1, m_p}$, $p \in \overline{1, P}$.

- Для каждой партии сборочных единиц определены партии деталей, которые войдут в сборку и которые должны быть завершены для успешного начала сборки. Номера партий, идущих в сборку, определены в массиве: $L_{pl} \in \overline{1, P}$, где $p \in \overline{1, P}$, $l \in \overline{1, l_p}$. l_p – количество предшествующих партий деталей. При этом должно выполняться ограничение (2), делающее невозможным перевод состояния работы в состояние готовности к выполнению ($S_p = 1$) на первом переходе ($C_p = 1$) сборки в том случае, если множество незавершенных ($C_{L_{pl}} > 0$) предшественников не является пустым:

$$\{L_{pl} \mid C_{L_{pl}} > 0, l \in \overline{1, l_p}\} \neq \emptyset \Rightarrow C_p = 1 \wedge S_p = 0, p \in \overline{1, P}. \quad (15)$$

В соответствии с требованиями подхода «*just in time*» участок k может и должен выполнять работы плана производства (\vec{F}), которые достигли даты начала и находятся в состоянии готовности к выполнению ($S_p = 1$), при этом в статус к выполнению ($S_p = 2$) переводятся все работы, для которых выполняются условия:

$$\vec{F} = \{p \mid t \geq DP_{C_p p} \wedge S_p = 1\}. \quad (16)$$

Однако практика управления производством показывает, что слепое следование рассчитанному в ERP-системе плану производства в следствии неизбежно возникающих отклонений приводит к рассинхронизации деятельности участков [155].

Введем понятие *карточки синхронизации*, предназначенной для синхронизации деятельности участков с целью минимизации производства невостребованной продукции, излишних запасов, повышения оперативности реагирования производства и снижения производственных циклов. Суть понятия аналогична карточкам POLCA, используемыми в QRM [27], но логика работы будет отличаться, что требует выделения отдельного определения. Карточка синхронизации имеет два обязательных

атрибута – участок отправитель и участок получатель. Каждый участок (получатель) выдает минимум по одной карточке каждому участку, который по технологическим цепочкам является поставщиком деталей (сборок) на участок. Количество карточек получателя для поставщика может быть увеличено, если материальный поток между участками особенно интенсивен.

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:

$$K_{k_1 k_2}^* = \sum_{p=1}^P q(p, k_1 k_2) \leq K_{k_1 k_2}, \text{ где } q(p, k_1 k_2) = \begin{cases} 1, M_{C_p p} = k_2 \wedge M_{C_{p+1} p} = k_1 \wedge S_p \in [2,3] \\ 0, M_{C_p p} \neq k_2 \vee M_{C_{p+1} p} \neq k_1 \vee S_p \in [0,1,4] \end{cases} \quad (17)$$

Если некоторая работа p выполняется ($S_p \in [2,3]$) на участке k_2 ($M_{C_p p} = k_2$) с последующей передачей на участок k_1 ($M_{C_{p+1} p} = k_1$), то считается, что используется одна карточка синхронизации $k_1 k_2$.

Требуется разработать систему синхронизации производства, которая, основываясь на информации, находящейся в ERP-системе в режиме реального времени определяет и передает к выполнению ($S_p = 2$) оптимальный набор партий \vec{FA} , выполнение которых наиболее целесообразно в текущий момент t с учетом принципов вытягивания, ограничения на незавершенное производство и приоритетности заказов.

Другими словами, требуется определить и перевести к выполнению такие партии $p^* \in \vec{FA}$, для которых выполняются следующие условия:

$$p^* \in \vec{F} = \{p \mid t \geq DP_{C_p p} \wedge S_p = 1\} \quad (18)$$

$$\sum_{p^* \in \vec{FA}} \omega(p^*, k_1, k_2) + K_{k_1 k_2}^* \leq K_{k_1 k_2}, \quad (19)$$

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

Как уже было сказано выше, активация работ должна происходить с учетом важности заказов и плановых дат начала обработки, что приводит к двум независимым математическим критериям оптимальности решения:

1. Важность заказов, активируемых в данный момент должна быть максимальна:

$$J_1 = \sum_{p^* \in \vec{FA}} W_{p^*} \rightarrow \max \quad (20)$$

2. Запускать следует партии, для которых плановая дата начала обработки минимальна:

$$J_2 = \sum_{p^* \in \vec{FA}} DP_{C_{p^*} p^*} \rightarrow \min \quad (21)$$

Приведенная выше постановка задачи является двухкритериальной задачей оптимизации с двумя независимыми критериями. Для того чтобы задача была разрешимой, предлагается использовать обобщенный критерий оптимальности, используемый для разрешения задачи в главе 3.1.

Для решения задачи с использованием индекса ранжирования (13) 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 (18) и (19), бывает невелико, что позволяет

осуществить такой переход и проводить выбор наилучшего плана напрямую с помощью индекса (13).

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

Содержательная постановка

Первые системы управления производственными процессами (MES – manufacturing execution system) появились еще в конце 1980-х с целью автоматизации и оптимизации процессов операционного планирования, управления загрузкой мощностей и оперативным учетом хода производства. Потенциальная полезность использования данного класса программного обеспечения признавалась всегда, однако, и до сих пор полноценно внедренные MES-системы остаются редкостью, как в России, так и на западе. Особенно полезны MES-системы могли бы быть для мелкосерийных производств, производящих сложную высокотехнологичную продукцию, ведь технологические процессы в таких производствах очень запутанные, количество взаимосвязей элементов системы очень велико, что делает фактически невозможным человеку формировать картину происходящего и осуществлять грамотное планирование и управление производством. Современные MES-системы обладают встроенными алгоритмами планирования расписания выполнения производственных операций и другими механизмами, необходимыми для построения системы управления производством уровня цеха, но обратной стороной использования данных систем являются чрезмерно высокие требования к уровню качества нормативно-справочной информации (НСИ), перечню параметров, которые необходимо указывать, и повышенной операционной нагрузкой на персонал цеха, связанной с необходимостью вести онлайн-учет выполнения всех технологических операций с множеством вводимых параметров. Именно эти обстоятельства являются

основной причиной неудач при внедрении MES-систем. В данной главе будет представлен альтернативный взгляд на построение MES-системы, основанный на снижении требований к качеству НСИ, интеллектуализации процесса ручного планирования и использования базы знаний для формирования оптимальных расписаний операций и снижения трудоемкости учетных операций без снижения качества получаемой информации.

Рассмотрим задачу управления производством уровня цеха на примере мелкосерийного машиностроительного предприятия. На таких предприятиях, как правило, действует система календарного планирования (обычно в рамках ERP-системы), определяющая планы выпуска готовых изделий, полуфабрикатов, график выполнения этапов производства (до уровня цеха) с указанием плановой даты запуска и завершения обработки партий полуфабрикатов в цехах. Календарное планирование осуществляется на основе календарных нормативов производства. Мощности и трудозатраты оцениваются объемно, без детализации по операциям.

В таких условиях задача внутрицехового управления состоит в том, чтобы обеспечить выполнение технологических операций над всеми партиями полуфабрикатов (деталей, сборок и прочее) в сроки, установленные системой календарного планирования. Это, в свою очередь, ведет к необходимости формирования оперативных планов выполнения технологических операций с привязкой к сотрудникам и оборудованию и дисциплинированному выполнению запланированных технологических операций.

В свою очередь, для каждой партии полуфабрикатов, поступающей в цех, заранее определен перечень технологических операций, который, как минимум, содержит информацию об участке выполнения операции, трудоемкости, профессии и разряде рабочего, используемом оборудовании,

сроке завершения работ в цехе. Полный перечень возможных параметров выполнения технологических операций чрезвычайно обширен, но здесь и далее будем исходить из минимальных требований к нормативно-справочной информации. Однако, для составления более полной картины факторов, которые влияют на принятие решения о назначении выполнения операции тому или иному рабочему и оборудованию, перечислим часто встречающиеся параметры: время переналадки оборудования (зависит от деталей предшественников); используемый инструмент и оснастка (от наличия будет зависеть возможность выполнения операции); реальная квалификация и специализация рабочего; техническое состояние единицы оборудования. Для формализованного описания всех возможных параметров потребовались бы отдельный процесс моделирования, уникальный для каждого производства, сбор необходимых данных для всех технологических операций, построение математической модели планирования, реализация алгоритмов планирования с учетом всех существенных параметров. Этот процесс может затянуться на годы, а в случае, если продукция предприятия постоянно меняется, данный процесс может стать вечной попыткой догнать то, что постоянно движется вперед с большей скоростью.

Производство может быть организовано в одну, две или три смены. Возможны ситуации, когда разные участки цеха работают в разное количество смен, что требует дополнительной синхронизации работы внутри цеха. Данный аспект в данной статье предлагается оставить за скобками, предполагается, что при решении общей задачи, модель легко будет адаптирована под условия реального производства. Для простоты изложения здесь и далее будем оперировать понятиями «Смена» – промежуток времени, в рамках которого выполняются технологические операции, считая, что весь цех работает в одном календарном графике работы.

Цех, как правило, разбит на участки, представляющие собой производственные подразделения, объединяющие ряд рабочих мест, сгруппированных по определённому признаку, осуществляющие часть общего производственного процесса по изготовлению продукции или обслуживанию процесса производства. На производственных участках, помимо основных и вспомогательных рабочих, имеется руководитель — мастер участка.

Участки создаются по двум принципам:

1. *Технологический*. Участок состоит из однотипного оборудования (группа токарных станков, группа фрезерных, сверлильных станков). Рабочие на участке выполняют определённый вид операции. Закрепление за рабочими местами изготовление определённых видов продукции отсутствует. Такой тип участков характерен для мелкосерийного и единичного типов организации производства.
2. *Предметно-замкнутый*. На таком участке используется разнотипное оборудование, которое располагается по ходу технологического процесса. Рабочие места специализируются на изготовлении определённого вида продукции (деталей). На участке заняты рабочие разных специальностей. Разновидностью такого типа участков являются поточные линии. Этот тип участков характерен для крупносерийного и массового производств, его работа отличается большей эффективностью по сравнению с участком, созданным по технологическому принципу.

Планирование работ участков осуществляется автономно, в рамках выполнения плана цеха, с учетом возникающих внутри отклонений и с учетом интересов других участков цеха. Таким образом, процесс внутрицехового управления делится на множество центров принятия решений и становится нелинейным и сложно предсказуемым. Как уже было

сказано выше, один человек не в состоянии планировать работу целого цеха, а автоматизированной системе недостаточно исходной информации, таким образом, существующая модель на сегодня единственно-возможная на практике.

Важным понятием при внутрицеховом управлении является *срочность* обработки той или иной партии полуфабрикатов. Данный параметр связан с установленным сроком завершения обработки в цехе, но явно из него не следует и во многом является нечетким. При этом роль данного параметра при принятии решений об очередности обработки партий полуфабрикатов и планировании производства чрезвычайно высока. В данной работе предложена одна из многих возможных методик определения срочности обработки партии полуфабрикатов как нечеткой функции от установленного срока завершения обработки полуфабрикатов в цехе (количества рабочих смен, оставшихся до завершения срока), трудоемкости невыполненных операций, количества невыполненных операций. Используя данный параметр, перечень партий полуфабрикатов, может быть отсортирован по срочности таким образом, чтобы первые в списке были наиболее срочные партии полуфабрикатов.

Исходя из вышеизложенной информации, оперативное управление в цехе будет состоять из планирования графика выполнения операций (формирования сменно-суточных заданий для рабочих с указанием оборудования) по участкам цеха, контроля выполнения заданий и принятия управляющих воздействий. Далее цикл повторяется. В реальном производстве, как правило, оперируют краткосрочными заданиями, максимум на 2 смены вперед, и по результатам работы каждой смены задания уточняются, исходя из факта выполнения работ. Таким образом, первая задача оперативного управления состоит в грамотном формировании сменно-суточных заданий по участкам цеха. В данной работе предлагается отказаться от полностью автоматизированных систем, которые, исходя из

текущего состояния производства и нормативно-справочной информации, полностью автоматически рассчитывают расписание выполнения операций. Как уже было сказано выше, перечень существенных для формирования сменных заданий параметров намного шире, чем может быть введен в систему, и, как результат, формируемые системой задания, будут неактуальны. Доверие к системе будет низким, и, по факту, будут выполняться совсем другие работы, что дискредитирует работу системы. Вместо этого предлагается построить автоматизированную систему управления производством, основываясь на следующих принципах:

1. До начала формирования сменных заданий в системе в полуавтоматическом режиме предлагается сформировать перечень сотрудников и оборудования, доступного к работе в текущей смене. Система может сама предложить список сотрудников, исходя из деления сотрудников по участкам и с учетом информации из системы контроля и управления доступом предприятия. Перечень оборудования должен быть сформирован также автоматически, с исключением оборудования, находящегося в ремонте или простое по другой причине. Оборудование может быть жестко привязано к сотруднику (выбор сотрудника автоматически выбирает оборудование, либо наоборот, выбор оборудования автоматически выбирает сотрудника).
2. Интерфейс формирования сменных заданий должен быть размещен в одном окне, в одной части которого располагается перечень сотрудников и оборудования, а в другой — перечень доступных к планированию операций.
3. Должны быть настроены быстрые фильтры, позволяющие быстро выделить следующие по технологическому процессу операции, следующие к назначению и т.д.

4. Должен быть реализован механизм быстрого назначения операций за исполнителями в одно движение (drag and drop или т.п.) с редким включением диалоговых окон (например, уточнить единицу оборудования и т.п.)
5. По завершению выполнения операций, данные о фактическом выполнении фиксируются в системе с указанием фактически выполненного количества, зафиксированных отклонениях и браке, отклонениях в трудоемкости и прочих параметрах, существенных для системы.
6. Результаты работы системы в ручном режиме *накапливаются и анализируются* с целью постепенного перевода системы в полуавтоматический и автоматический режимы работы.
7. В интерфейсе добавляются элементы, позволяющие частично или полностью автоматически сформировать суточные задания.
8. В интерфейсе добавляются элементы, позволяющие частично или полностью автоматически осуществлять приемку работ и автоматически фокусировать внимание на операциях с повышенным риском невыполнения и брака.

Рассмотрим аналитику, которая накапливается в системе и составляет исходную базу знаний для анализа:

- 1) Полуфабрикат (деталь, сборка).
- 2) Технологическая операция.
- 3) Трудоемкость операции.
- 4) Количество операций к выполнению.
- 5) Исполнитель.
- 6) Единица оборудования.
- 7) Фактическое количество выполненных операций.
- 8) Фактическая трудоемкость выполнения.
- 9) Фактическое количество операций с отклонениями.

Предоставленной аналитики достаточно, чтобы выявить в ходе статистического анализа следующие закономерности:

- 1) Специализация исполнителя и оборудования (может отличаться от изначально заявленного). Определяется частотой назначения исполнителя на единицу оборудования.
- 2) Специализация исполнителя по полуфабрикатам.
- 3) Специализация оборудования по полуфабрикатам.
- 4) Специализация исполнителя по типам операций.
- 5) Специализация оборудования по типам операций.
- 6) Средний процент полуфабрикатов с отклонениями в разрезе исполнителей и оборудования.
- 7) Средний процент превышения трудоемкости выполнения.
- 8) Средний процент окончательного брака.

При построении аналитики следует учитывать, что производственная среда постоянно меняется, а также уровень подготовки сотрудников и состояние оборудования. Таким образом, при построении аналитики более свежие результаты должны учитываться с большим весом, нежели старые. Предлагается линейная зависимость уменьшения веса с нулевой точкой в 12 месяцев.

Исходя из вышеописанных условий, информационная система должна выполнять следующие интеллектуальные функции на основе сформированной базы знаний:

1. Автоматически формировать суточные задания участка.
2. Автоматически фокусировать внимание на операциях с повышенным риском невыполнения и брака.

Постановка задачи построения интеллектуальной системы формирования и учета выполнения сменных заданий не является единственно-возможной, для конкретного предприятия, возможно, будет требоваться модификация задачи с учетом специфики производства. При

этом, задача имеет крайне низкие требования к качеству и составу нормативно-справочной информации, что позволит осуществить запуск такой системы в кратчайшие сроки. Сотрудник, ответственный за формирование сменных заданий, всегда может внести корректировки в автоматически сформированные задания, которые в дальнейшем будут также учтены при последующей работе системы. Предлагаемая система способна многократно снизить трудозатраты на формирование сменных заданий, повысить качество планирования, увеличить скорость реакции на изменения в производстве и снизить количество возникающих отклонений за счет использования специализации исполнителей и оборудования. Как результат, может быть снижен процент брака на производстве, повысится выработка рабочих, сократятся прецеденты срыва сроков отгрузки продукции потребителю.

Математическая постановка

На начало планирования известен полный перечень партий полуфабрикатов подлежащих обработке в цехе P_i , где $i \in \overline{1, P}$ – количество партий в производстве. Известны размеры партий ДСЕ PC_i .

Временную шкалу представим для удобства в виде номера рабочей смены d , где текущая смена имеет номер $d = 0$. Следующие смены имеют номера $d \in 1, 2, 3 \dots$, а предыдущие смены имеют отрицательные номера $d \in -1, -2, -3 \dots$

Плановый срок завершения обработки партии полуфабрикатов в цехе задается в виде номера смены d и указан для всех партий полуфабрикатов u_i

Для каждой партии полуфабрикатов определен перечень операций o_{ij} . Перечень сформирован таким образом, что на момент составления расписания все полностью выполненные технологические операции из него исключены, таким образом, первая операция партии ($j = 1$) – на самом деле первая невыполненная операция в партии. При этом, возможна ситуация,

при которой партия полуфабрикатов в производстве разделяется на несколько. Для таких случаев для каждой операции указано количество полуфабрикатов в партии, для которых данная операция должна быть выполнена oc_{ij} . При этом, технологические операции должны выполняться строго по порядку. Таким образом, количество последующих операций всегда больше или равно количеству операций предшественников:

$$oc_{ij} \leq oc_{ij+1} \leq PC_i \quad (22)$$

Для каждой операции определена общая трудоемкость выполнения операции для всего количества полуфабрикатов, доступных к выполнению tr_{ij} и указан участок выполнения операции st_{ij} .

Известным является список рабочих и/или бригад рабочих (далее исполнители) для назначения сменных заданий $W_k, k \in \overline{1, W}$ – общее количество исполнителей в смене. Также известен перечень доступного оборудования $M_c, c \in \overline{1, M}$ – количество единиц оборудования. Для каждой операции технологией определены требования к профессии и разряду рабочего, типу используемого оборудования. Для каждой операции введем подмножества сотрудников W_k^{ij} и оборудования M_c^{ij} , соответствующих требованиям технологического процесса для данной операции. Известна длительность смены Dl . Определена максимальная выработка каждого исполнителя Dl_k , которая, как правило, будет равна длительности смены, но при использовании бригадной или многостаночной работы может существенно отличаться в большую сторону.

Введем функцию срочности обработки партии полуфабрикатов, которая принимает меньшие значения при увеличении срочности обработки полуфабрикатов, если оставшегося для обработки времени недостаточно для обработки в срок, функция принимает отрицательные значения:

$$U(i) = Dl \times u_i - \sum_j tr_{ij} - \rho \times \sum_j sign(o_{ij}) \quad (23)$$

, где ρ – время пролеживания

Параметр *время пролеживания* характеризует среднюю величину времени межоперационного пролеживания и транспортировки полуфабрикатов от одного места выполнения к другому. Данный параметр является условной величиной и подбирается экспертным путем [156].

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

$$T_s = (d_s, o_s, ot_s, w_s, m_s, tr_s) \quad (24)$$

, 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:

1. Количество выдаваемых операций не должно превышать количество операций в плане:

$$5. \sum_{o_s=o_{ij}} ot_s \leq oc_{ij} \quad (25)$$

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

$$\sum_{w_s=W_k} tr_s \leq Dl_k \quad (26)$$

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

$$\sum_{m_s=M_c} tr_s \leq Dl \quad (27)$$

4. Порядок выполнения операций не должен нарушаться:

$$\sum_{o_s=o_{ij}} ot_s + PC_i - o_{ij} \leq \sum_{o_s=o_{ij+1}} ot_s + PC_i - o_{ij+1} \quad (28)$$

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

$$F_a = (d_a, o_a, ot_a, w_a, m_a, tr_a, of_a, ob_a, trf_a) \quad (29)$$

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:

$$Sp(o_{ij}, W_k, M_c) = \sum_{\substack{ot_a=of_a \\ tr_a=trf_a \\ d_a \in [-D, 0]}}^{o_{ij}, W_k, M_c} sign(ot_a) \times \left(1 + \frac{d_a}{D}\right) - \sum_{\substack{ot_a \neq of_a \\ tr_a \neq trf_a \\ d_a \in [-D, 0]}}^{o_{ij}, W_k, M_c} sign(ot_a) \times \left(1 + \frac{d_a}{D}\right) \quad (30)$$

Значения функции специализации используются как при назначении работ исполнителю, так и при приемке работ – система автоматически выделяет цветом операции, имеющие низкий уровень специализации с целью фокусировки внимания на операциях, которые потенциально несут риски выполнения с отклонениями от заданных нормативов [157].

Критерии оптимизации

Рассмотрим частные критерии оптимальности сменного задания:

1. Срочность назначаемых работ должна быть максимальна:

$$J_1 = \sum U(T_s) \rightarrow \min \quad (31)$$

2. Риск невыполнения операций по причине невыполнения предшествующих операций должен быть минимален, т.е. сначала

должны выдаваться в работу первые операции, а только потом последующие. Подразумевается, что риск невыполнения операций линейно возрастает в зависимости от количества предшествующих операций в сменном задании:

$$J_2 = \sum j(T_s) \rightarrow \min \quad (32)$$

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

$$J_3 = -\sum Sp(T_s) \rightarrow \min \quad (33)$$

Для того чтобы задача была разрешимой, предлагается использовать обобщенный критерий оптимальности, используемый для разрешения задачи в главе 3.1.

3.4. Задача поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия (интеллектуальный анализ и поиск решений)

Вопросы проектирования и создания интеллектуальных систем поддержки принятия коллективных решений на основе моделей многокритериального выбора особенно актуальны в настоящее время, так как их решение позволяет качественно улучшить показатели функционирования различных социально-технических систем за счет совершенствования процедуры выбора обоснованного управленческого решения. Методологической базой создания такой процедуры являются системный анализ и математическое моделирование.

Рассматриваются модели коллективного выбора, начиная от простейших моделей голосования до сложных многокритериальных моделей, в том числе в условиях неполноты и нечеткости исходной информации. Эти модели могут использоваться для компьютерной поддержки задач прогнозирования, стратегического планирования и

генерации коллективных управленческих решений в рамках создаваемых экспертных систем, основанных на знаниях.

Экспертными системами (ЭС) называются сложные программные комплексы, аккумулирующие знания специалистов в конкретных предметных областях (экспертов) и тиражирующие этот эмпирический опыт для решения интеллектуальных задач (ИЗ), которые являются неформализованными, т.е. обладают одним или несколькими из следующих признаков:

- не могут быть заданы в числовой форме;
- цели решения не могут быть заданы в виде аналитических функций;
- не существует общепризнанного алгоритма решения.

Главным отличием ЭС от информационных систем обработки данных является то, что в них используется символьный, а не числовой способ представления данных, а в качестве методов обработки информации применяются алгоритмы логического вывода и эвристического поиска решений ИЗ. Сфера использования ЭС охватывает самые разные предметные области, среди которых можно выделить управление, проектирование, производство, медицину, образование и т.д.

Одной из распространенных ИЗ является поддержка принятия решений (ППР) – формирование рекомендаций лицу, принимающему решение (ЛПР), позволяющих облегчить выбор наилучшего решения на заданном множестве альтернатив.

Знания экспертов в ЭС задаются в виде базы знаний с использованием одной из моделей представления знаний (например, продукционной в виде набора правил) или в виде предпочтений на множестве возможных решений (альтернатив). ЭС содержат компонент в форме решателя, который осуществляет обработку знаний и формирует решение ИЗ. В случае задачи ППР решатель ЭС обрабатывает предпочтения экспертов на основе одной или нескольких моделей, некоторые из которых рассматриваются ниже.

Основателем теории принятия коллективных решений считается нобелевский лауреат Джеймс Стиглиц, первым предложивший механизмы принятия решений для различных организационных структур. Вопросы построения иерархии знаний и организационных структур рассмотрены в многочисленных работах отечественных ученых, например в исследованиях [158, 159]. Модели принятия коллективных решений в производственных системах рассмотрены в работах [139, 82].

Следует отметить, что интеллектуальные информационные системы поддержки принятия решений, построенные на моделях многокритериального выбора, получают всё большее распространение в различных предметных областях и требуют от специалистов глубоких знаний в сфере информационных систем и технологий.

В рамках данной работы для поддержки принятия коллективных решений предлагается использовать ситуационный центр промышленного предприятия. Далее рассматривается один из возможных алгоритмов решения задачи коллективного выбора с учетом взаимных (часто антагонистических) интересов всех участников, представляющих различные структурные подразделения предприятия.

Постановка задачи поддержки коллективного решения

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.

При решении данной задачи вводятся следующие гипотезы:

– ЛПР представляет собой двухуровневую структуру, состоящую из рабочей группы экспертов (ГЛПР) и ответственного лица (ОЛПР), принимающего или не принимающего окончательное решение;

– ГЛПР – совокупность лиц, представляющих соответствующую структуру (например, для промышленного предприятия – это отдел снабжения, производственный отдел, отдел сбыта и т.п.), важность мнения которых может быть как равнозначной, так и различной по каждой ситуационной задаче и каждому показателю качества принимаемого решения;

– частные показатели качества также могут иметь различную важность для принятия коллективного решения.

Для организации процесса принятия решений можно сформировать одну из трех организационных структур: комитет, иерархию или полиархию [38, 42]. В комитете рассматриваемый проект отдается на ознакомление всем менеджерам. По результатам ознакомления проводится голосование, и проект принимается, если за него проголосовало больше определенной доли менеджеров. Такая организация оправдана, если квалификация всего менеджерского звена приблизительно одинакова. При иерархии менеджеры выстроены в цепочку и знакомятся с проектом последовательно. Проект окончательно отклоняется, если его отклоняет хотя бы один менеджер в заданной цепочке иерархии, и направляется на рассмотрение к следующему менеджеру в случае его рассмотрения предыдущим. Такая организация принятия решений может быть рекомендована, если квалификация всех менеджеров, принимающих решения, очень высока, так как отрицательное мнение любого из них приводит к отклонению всего рассматриваемого проекта. В полиархии проект направляется одному из менеджеров с равной

вероятностью и принимается окончательно, если менеджер его принимает, и отклоняется в противном случае. По существу, речь идет о том, что случайно выбранный менеджер является лицом, принимающим решение от всей группы менеджеров. Очевидно, что недостатком этого подхода является зависимость окончательного решения от случайного выбора ЛПР, несмотря на его квалификацию. Отметим, что представленные организационные формы можно комбинировать, строя из них более сложную организационную структуру принятия решений. Например, можно рассматривать иерархию, каждый элемент которой представляет собой комитет. Также можно рассматривать иерархию из полиархий или полиархию из иерархий.

Например, для задачи принятия коллективных решений на промышленном предприятии удобно использовать комитет в рамках ситуационного центра [148]. Это связано с тем, что другие формы организации принятия коллективного решения требуют больших затрат времени на согласование компромиссного решения, а в рамках текущего производства это не всегда оправданно.

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. Обозначим численное значение k -го частного показателя для j -й альтернативы $J_k^j, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, r$, где r – количество показателей. Отметим, что эти значения для показателей качества функционирования некоторой системы всегда будут неотрицательными (например, для производственной системы: время выполнения заказа, вероятность поломки оборудования, затраты и т.п.). Исходя из этого можно считать, что *наилучшее* решение для некоторого k -го частного показателя достигается при его *максимальном* значении. При этом должен быть создан банк моделей, позволяющих строить допустимое

множество альтернатив для возможных ситуаций в исследуемой системе с определением значений частных показателей качества каждой альтернативы. Пример набора моделей управления промышленным предприятием на этапе планирования производства приведен в работах [160, 161, 162].

Считается, что ГЛПР состоит из m экспертов и известны предпочтения \succ^i , $i = 1, \dots, m$, каждого эксперта на множестве альтернатив X . Под предпочтением i -го эксперта будем понимать набор данных о ранжировании всех рассматриваемых альтернатив. При этом эксперт может высказывать свое мнение как по каждой альтернативе в целом, так и по частным показателям качества рассматриваемой альтернативы.

Требуется найти коллективное решение ситуационной задачи, под которым понимается некое групповое предпочтение \succ на множестве X , полученное на основе обработки частных предпочтений всех участников ГЛПР. При этом формой организации принятия решений ГЛПР считается комитет.

Рассмотрим модели принятия коллективных решений в рамках комитета, которые, по мнению автора, наиболее приемлемы для производственных систем.

Первоначально рассмотрим две модели, часто применяемые для принятия коллективных решений в социальных и экономических системах.

Модели голосования Кондорсе и Борда

Одной из простейших и наиболее часто встречающихся на практике моделей голосования является модель Кондорсе (французский ученый маркиз де Кондорсе в конце XVIII века предложил процедуру определения победителя в ходе демократических выборов). Сущность данной модели состоит в следующем.

На основании полученных от экспертов результатов ранжирования для каждой пары альтернатив x_j, x_k подсчитывается число экспертов $l(x_j, x_k)$, считающих альтернативу x_j более предпочтительной, чем x_k . Если $l(x_j, x_k) > l(x_k, x_j)$, то альтернатива x_j признается предпочтительнее x_k . Наилучшей альтернативой (альтернативой Кондорсе) объявляется альтернатива x_j , если выполняется условие

$$l(x_j, x_k) \geq l(x_k, x_j) \text{ для всех } j, k = 1, \dots, n; j \neq k. \quad (34)$$

Пример 1. Пусть множество X содержит 10 альтернатив. Данные результатов их ранжирования пятью экспертами имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} x_2 \overset{1}{>} x_1 \overset{1}{>} x_3 \overset{1}{>} \dots \overset{1}{>} x_{10}, x_2 \overset{2}{>} x_1 \overset{2}{>} x_3 \overset{2}{>} \dots \overset{2}{>} x_{10}, x_1 \overset{3}{>} x_3 \overset{3}{>} \dots \overset{3}{>} x_{10} \overset{3}{>} x_2, \\ x_3 \overset{4}{>} x_1 \overset{4}{>} x_4 \overset{4}{>} \dots \overset{4}{>} x_{10} \overset{4}{>} x_2, x_4 \overset{5}{>} x_1 \overset{5}{>} x_3 \overset{5}{>} \dots \overset{5}{>} x_{10} \overset{5}{>} x_2, \end{aligned}$$

где $\overset{i}{>}$, $i = 1, \dots, 5$ – строгое предпочтение i -го эксперта.

По формуле (34) определяем парные предпочтения экспертов.

Поскольку $l(x_1, x_2) = 3 > l(x_2, x_1) = 2$, то альтернатива x_1 признается предпочтительнее x_2 , т.е. $x_1 > x_2$. Аналогично для других альтернатив:

$$l(x_1, x_3) = 4 > l(x_3, x_1) = 1, \text{ значит, } x_1 > x_3,$$

$$l(x_1, x_4) = 4 > l(x_3, x_1) = 1, \text{ значит, } x_1 > x_4,$$

.....

$$l(x_2, x_3) = 2 < l(x_3, x_2) = 3, \text{ значит, } x_3 > x_2,$$

$$l(x_2, x_4) = 2 < l(x_4, x_2) = 3, \text{ значит, } x_4 > x_2,$$

$$l(x_3, x_4) = 4 > l(x_4, x_3) = 1, \text{ значит, } x_3 > x_4.$$

В результате парного сравнения коллективное ранжирование альтернатив имеет следующий вид:

$$x_1 \succ x_3 \succ x_4 \succ \dots \succ x_{10} \succ x_2,$$

а наилучшей альтернативой по условию (34) является альтернатива x_1 .

Основным недостатком данной модели является то, что она не всегда обеспечивает достаточность при определении наилучшей альтернативы с помощью непосредственного подсчета голосов экспертов по правилу большинства (нет единственности решения). Эта проблема получила название «парадокс Кондорсе». Данный парадокс является следствием нетранзитивности коллективных предпочтений. В реальных экспертизах, когда мнения экспертов существенно различаются, вероятность возникновения парадокса Кондорсе возрастает. В этом случае необходимо использовать более сложные модели.

Пример 2. Пусть множество X состоит из 3-х альтернатив, которые были ранжированы 3-я экспертами следующим образом:

$$x_1 \overset{1}{\succ} x_2 \overset{1}{\succ} x_3; \quad x_3 \overset{2}{\succ} x_1 \overset{2}{\succ} x_2; \quad x_2 \overset{3}{\succ} x_3 \overset{3}{\succ} x_1.$$

Тогда, используя модель Кондорсе, получим:

$$l(x_1, x_2) = 2 > l(x_2, x_1) = 1, \text{ значит } x_1 \succ x_2;$$

$$l(x_2, x_3) = 2 > l(x_3, x_2) = 1, \text{ значит } x_2 \succ x_3, \text{ но}$$

$$l(x_1, x_3) = 1 < l(x_3, x_1) = 2, \text{ значит } x_3 \succ x_1.$$

Значит, альтернативы Кондорсе нет.

Модель Борда

Другой моделью голосования, в последнее время получившая широкое распространение, является *модель Борда*. Согласно данной модели, результаты голосования экспертов выражаются в виде числа баллов, набранных каждой альтернативой. Для этого вводится функция Борда $b(x_j)$ следующим образом:

$$b(x_j) = \sum_{k=1}^n [l(x_j, x_k) - l(x_k, x_j)], \quad (35)$$

где $l(x_j, x_k)$ – число экспертов, для которых альтернатива x_j предпочтительней x_k .

Наилучшей считается альтернатива x_j , у которой функция Борда $b(x_j)$ принимает наибольшее значение.

Пример 3. Пусть даны три альтернативы, а результаты их ранжирования десятью экспертами приведены в таблице 5.

Таблица 5 Результаты ранжирования альтернатив

Вариант сравнения	Число экспертов, проголосовавших за данный вариант	Предпочтения экспертов
1	4	$x_1 \succ x_2 \succ x_3$
2	2	$x_1 \succ x_3 \succ x_2$
3	2	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$
4	–	$x_2 \succ x_3 \succ x_1$
5	1	$x_3 \succ x_1 \succ x_2$
6	1	$x_3 \succ x_2 \succ x_1$

Определяем значения функции Борда по формуле (35):

$$b(x_1) = (7 - 3) + (8 - 2) = 10,$$

$$b(x_2) = (3 - 7) + (6 - 4) = -2,$$

$$b(x_3) = (2 - 8) + (4 - 6) = -8.$$

Значит $b(x_1) = \max b(x_j, j = 1, 2, 3)$, а наилучшей альтернативой является альтернатива x_1 .

В связи с тем, что значения функции Борда $b(x_j)$, подсчитываемые по формуле (3.2), могут быть отрицательными, что не совсем удобно при

определении наибольшего значения функции, на практике чаще используют обобщенное правило Борда: за первое место при попарном сравнении альтернатив присуждается n баллов, за второе – $n - 1$ баллов и т.д. После этого подсчитывается сумма баллов для каждой альтернативы. Лучшей считается та альтернатива, которая набирает большую сумму баллов.

Пример 4. Произведем выбор наилучшей альтернативы по обобщенному правилу Борда для данных задачи из примера 3. Для этого подсчитаем число баллов, набранных каждой альтернативой:

$$b(x_1) = 6 \cdot 3 + 3 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 25 \text{ баллов,}$$

$$b(x_2) = 2 \cdot 3 + 5 \cdot 2 + 3 \cdot 1 = 19 \text{ баллов,}$$

$$b(x_3) = 2 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 6 \cdot 1 = 16 \text{ баллов.}$$

Значит, по модели Борда лучшее коллективное решение – также альтернатива x_1 .

Преимуществом данной модели является то, что всегда существует наилучшая альтернатива (или несколько наилучших альтернатив, если они набирают одинаковое количество баллов). При этом, если решение по модели Кондорсе существует, то оно, как правило, совпадает с решением по модели Борда.

Все описанные выше модели не учитывают многокритериальность выбора при сравнении альтернатив. Другими словами, не учитываются предпочтения экспертов в рамках каждой альтернативы, определяемой набором частных критериев оптимальности. Кроме того, не учитывается *важность (квалификация)* экспертов при многокритериальной оценке каждой альтернативы.

Попытаемся избежать этих недостатков с помощью построения *многокритериальных* моделей выбора с учетом важности частных показателей качества альтернативы. При этом комплексное оценивание качества каждой

альтернативы может производиться различными способами, например с помощью линейных и нелинейных (матричных) сверток [159], а также нечетких множеств [163, 164]. Рассмотрим некоторые многокритериальные модели коллективного выбора на основе ранжирования частных критериев, комплексного оценивания альтернатив в виде линейной свертки частных показателей (линейная многокритериальная модель), а также нелинейную модель на основе теории нечётких множеств.

Модели многокритериального выбора при принятии коллективных решений

Основной проблемой выбора коллективных решений является неопределенность в виде многокритериальности задачи. Одна альтернатива может быть предпочтительнее остальных по одному частному критерию, другая – по другому критерию и т.д., поэтому возникает проблема устранения этой неопределенности за счет получения некоторой дополнительной информации от экспертов.

Одним из путей решения задачи многокритериального выбора является ее сведение к однокритериальной задаче, когда наилучшая альтернатива выбирается по одному (наиболее важному) критерию.

В этом случае выбор такого критерия можно осуществить *методом ранжирования частных критериев* [165]. Рассмотрим этот метод подробнее.

Метод ранжирования заключается в следующем. Пусть экспертиза проводится группой из L экспертов, которые являются квалифицированными специалистами в той области, где принимается решение. Метод ранжирования основан на том, что каждого эксперта просят расставить частные критерии проектируемого объекта в порядке их важности. Цифрой 1 обозначают наиболее важный частный критерий, цифрой 2 – следующий по важности частный критерий и т.д. Эти ранги преобразовываются таким образом, что ранг 1 получает оценку m (m – число

частных критериев), ранг 2 – оценку $m - 1$ и т.д. до ранга m , которому присваивается оценка 1. Обозначим полученные оценки r_{ji} , где j – номер j -го эксперта, i – номер i -го критерия. Результаты опроса экспертов сводятся в таблице 6.

Таблица 6 Результаты опроса экспертов

Эксперты	Критерии			
	F_1	F_2	...	F_m
1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1m}
2	r_{21}	r_{22}		r_{2m}
.
.
.
L	r_{L1}	r_{L2}	...	r_{Lm}
? оценок	r_1	r_2	...	r_m

Теперь ранг i -го критерия можно вычислить следующим образом:

$$r_i = \sum_{j=1}^L r_{ji}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (36)$$

Результаты ранжирования критериев заносятся в $(L + 1)$ -ю строку табл.

4.1. Весовые коэффициенты определяются по следующей формуле:

$$\lambda_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (37)$$

Наиболее важным критерием считается критерий, соответствующий максимальному значению весового коэффициента.

Рассмотрим пример.

Пример 5. Пусть имеются группа из трех экспертов и два критерия F_1 и F_2 . Эксперты их расставили в порядке, указанном в таблице 7.

Таблица 7

Эксперты	Места	
	1	2
1	F_1	F_2
2	F_2	F_1
3	F_1	F_2

Определим элементы таблицы 7 согласно алгоритму ранжирования, приведенному выше (первому месту – 2 балла, а второму – 1 балл): $r_{11} = 2$, $r_{12} = 1$, $r_{21} = 1$, $r_{32} = 1$. Данные занесем в таблицу 8.

Таблица 8

Эксперты	Критерии	
	F_1	F_2
1	2	1
2	1	2
3	2	1
Сумма	$r_1 = 5$	$r_2 = 4$

Тогда по формулам (36) и (37) определим

$$\sum_{i=1}^m r_i = 5 + 4 = 9,$$

$$\varphi_1 = r_1/9 = 5/9, \varphi_2 = r_2/9 = 4/9.$$

Таким образом, $\varphi_1 > \varphi_2$ и 1-й критерий важнее 2-го.

Теперь рассмотрим линейную модель многокритериального выбора. Пусть количество допустимых альтернатив равно n , число экспертов – m .

Количество частных показателей качества, характеризующих каждую из возможных альтернатив, равно r . Для построения модели введем следующие обозначения:

$\beta_k^j, j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, r$ – оценка квалификации j -го эксперта по k -му показателю качества альтернативы;

λ_j^i – предпочтения каждого эксперта $j, j = 1, \dots, m$ на множестве альтернатив X ;

$\nu_k, k = 1, \dots, r$ – важность (значимость) k -го частного показателя качества альтернативы.

Численно все значения предпочтений и важностей задаются в диапазонах от 0 до 1, с наихудшего (наименее значимого) до наилучшего (наиболее значимого).

Как отмечено выше, численное значение k -го частного показателя для i -й альтернативы обозначено $J_k^i, i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, r$. Будем считать, что *наилучшее* решение для некоторого k -го частного показателя достигается при его *максимальном* значении. Если же *наилучшее* решение достигается при его *минимальном* значении, то в исследуемом случае при положительности значений частных показателей всегда от *максимума* можно перейти к *минимуму* путем несложных математических преобразований.

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

$$pr(x_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_j^i \left(\sum_{k=1}^r \beta_k^j \nu_k J_k^i \right), i = 1, \dots, n. \quad (38)$$

Отметим, что если k -й частный показатель для i -й альтернативы J_k^i необходимо минимизировать, $i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, r$, то переопределим этот показатель следующим образом:

$$J_k^i = 1 - \frac{J_k^i}{\max_{i,k}(J_k^i)}. \quad (39)$$

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

$$pr(x_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_j^i (\sum_{k=1}^r \nu_k \cdot J_k^i), i = 1, \dots, n. \quad (40)$$

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

$$pr(x_i) > pr(x_l), \forall i, l = 1, \dots, n, i \neq l. \quad (41)$$

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. Существует несколько подходов, позволяющих отказаться от данной гипотезы. Например, в работе [166] предлагается рассматривать задачу многокритериального выбора наилучшей альтернативы как задачу «аксиоматического построения результирующего ранжирования» при условии, что значения каждого из введенных частных критериев имеют только три градации (например, «плохо», «удовлетворительно» и «хорошо»), а используемое для выбора наилучшей альтернативы правило – это некоторое введенное пороговое правило. Предложенная модель хорошо зарекомендовала себя в задачах выбора в социальных системах, характеризующихся именно трехранговым ранжированием объектов оценивания. Однако в производственных системах часто объекты исследования имеют количественную оценку, которая не всегда может быть обоснованно сведена к трехранговому

ранжированию, поэтому рассмотрим еще один способ ухода от линейной гипотезы, который заключается в переходе к нечеткой постановке путем введения обобщенного показателя качества в виде специального нечеткого множества.

Рассмотрим многокритериальную модель выбора на основе теории нечетких множеств.

В качестве обобщенного критерия выбора введем нечеткое множество J^r , полностью аналогичное нечеткому множеству обобщенного критерия, описанного в главе 3.1, но для произвольного количества производственных показателей. При этом для сравнения альтернатив по значениям обобщенного критерия необходимо использовать специальный индекс ранжирования (13). Необходимость введения такого индекса обусловлена тем, что, во-первых, различные показатели качества объектов производственной системы могут иметь различную физическую природу и, как следствие, различную размерность, которая нивелируется введением безразмерной величины C_i (i – номер соответствующего показателя), а во-вторых, этот индекс учитывает только те показатели, которые являются определяющими при обобщенной оценке качества. Подробно процедура введения такого индекса ранжирования рассмотрена в работе [167].

Пример 6. Пусть имеется две альтернативы, которым соответствуют два обобщенных критерия выбора в виде специальных нечетких множеств с четырьмя частными показателями, заданных следующим образом:

$$J^{r1} = (0,1/1; 0,8/4; 0,06/90; 0,4/3), J^{r2} = (0,1/2; 0,8/3; 0,06/80; 0,4/4).$$

Выберем преимущественную альтернативу. Для этого применим индекс ранжирования (3.18):

$$C_1 = 0,1 \frac{-(1-2)}{2} = -0,05, C_2 = 0,8 \frac{-(4-3)}{4} = 0,2, C_3 = 0,06 \frac{-(90-80)}{90} = 0,066, C_4 = 0,4 \frac{-(3-4)}{4} = -0,1.$$

При этом $\text{sign}C_2 = \text{«+»}$ следовательно $J^{r1} > J^{r2}$, т.е. в данном случае 1-я альтернатива предпочтительней 2-й.

Если значение i не единственно, то определим число l , равное количеству одинаковых по модулю экстремумов, и вычислим вспомогательный параметр $\gamma = \sum_{i=1}^l \text{sign } C_i$.

При этом если $\gamma = 0$, то $J^{r1} = J^{r2}$; если $\gamma < 0$, то $J^{r1} < J^{r2}$; если $\gamma > 0$, то $J^{r1} > J^{r2}$.

Пример 7. Пусть в отличие от примера 6 значение 4-го частного показателя в критерии J^{r2} изменено, т.е.

$$J^{r1} = (0,1/1; 0,8/4; 0,06/90; 0,4/3), J^{r2} = (0,1/2; 0,8/3; 0,06/80; 0,4/6).$$

Тогда при сравнении двух альтернатив получим

$$C_1 = 0,1 \cdot \frac{(1-2)}{2} = -0,05, C_2 = 0,8 \cdot \frac{(4-3)}{4} = 0,2, C_3 = 0,06 \cdot \frac{(90-80)}{90} = 0,066, C_4 = 0,4 \cdot \frac{(3-6)}{6} = -0,2.$$

$\gamma = -1 + 1 = 0 \Rightarrow J^{r1} = J^{r2}$. Это означает, что в данном случае обе альтернативы равнозначны и окончательный выбор требует дополнительных исследований. Например, можно уточнить важности частных показателей или ввести дополнительный показатель и т.п.

В общем случае выбор наилучшей альтернативы производится путем попарного сравнения альтернатив с помощью предложенного индекса ранжирования (13). Как видно из примера 7, при некоторых условиях предпочтительной альтернативы может не быть. В этом случае можно, например, считать, что альтернатива, которая при полном переборе парных сравнений доминирует большее количество раз, считается наиболее предпочтительной.

Выводы по главе

В главе предложены математические модели для основных интеллектуальных элементов, которые при встраивании в существующее

ERP-решение должны радикально изменить систему управления предприятием в лучшую сторону, создав основу для существенного улучшения основных показателей операционной эффективности. В результате разработаны предложены следующие математические модели, которые должны лечь в основу практической реализации интеллектуальной системы управления предприятием:

1. Многокритериальная задача оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала в условиях нечеткой исходной информации, отличающуюся учетом ограничений на все виды ресурсов, несколькими критериями оптимальности плана и использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности для построения обобщенного критерия оптимальности.
2. 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.
3. Задача оптимального управления производством на оперативном уровне управления 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 адекватного решения.

4. Задача поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия, которая способна учитывать специфику предметной области и дополнительные ограничения.

Для практической реализации интеллектуальных элементов системы необходимо найти решение сформулированных задач оптимизации аналитическим или любым доступным способом. Предложенные задачи с некоторыми ограничениями возможно бы было свести к задачам линейного программирования, но высокая размерность задач и наличие множества независимых критериев оптимальности делает это практически невозможным в общем случае. В следующей главе будут рассмотрены возможные пути решения и задач и предложены оптимальные для практического использования.

Глава 4. Применение методов математического и имитационного моделирования при решении интеллектуальных задач управления

Общая форма задач оптимизации, описанных в главе 3, соответствует общей форме задачи линейного программирования, за исключением того, что вместо одной целевой функции используются две и более. Данное свойство представленных задач делает невозможным использование методов линейного программирования для их полноценного решения [168]. Однако в случае, если один из критериев возможно бы было выбрать основным или же подобрать линейную свертку критериев в один – тогда задачи вполне можно решить методами линейного программирования. Обычно для решения дискретных задач оптимизации с линейной зависимостью переменных используют методы линейного программирования (симплекс метод и т.п.), которые не раз доказывали свою эффективность [169, 170].

В рамках данной работы принято решение не вводить упрощений в постановку задач чтобы исключить отсечение рядов (Парето-множеств)

оптимальных решений, которые неизбежно появятся при линейной свертке или же выборе основного критерия. При этом методы линейного программирования активно использовались при решении тестовых задач. Это было необходимо для проверки адекватности эвристических алгоритмов, предложенных в рамках данной работы. В процессе решения тестовых задач был сделан дополнительный вывод о возможности применения существующих методов решения задач линейного программирования для решения задач планирования и других задач оптимизации. При попытке поиска решения на реальных наборах данных оказалось, что размерность получаемой системы уравнений выходит за миллиард переменных, что даже при существующих мощностях компьютерной техники не позволяет находить решения такой задачи за адекватное время. Ввиду того, что целью данной работы является практическая реализация интеллектуальной системы управления предприятием было принято решение отказаться от идеи практического использования существующих методов решения задач линейного программирования.

В данной главе рассматривается эвристический подход к решению задач оптимизации. Эвристический подход предполагает при поиске оптимального решения использование различных эвристик, уменьшающих число возможных вариантов решения за счет дополнительных допущений, сделанных на основе «здравого смысла», опыта и/или предварительного исследования свойств решаемой оптимальной задачи.

В дальнейшем под эвристикой будем понимать эвристический алгоритм решения задачи, правильность которого для всех возможных случаев не доказана, но про который известно, что он даёт достаточно хорошее решение в большинстве случаев. В действительности эвристический алгоритм может быть формально неверен при этом его всё равно можно применять, если при этом он даёт неверный результат только в отдельных,

достаточно редких и хорошо выделяемых случаях или же даёт неточный, но всё же приемлемый результат. Таким образом эвристика не является математически обоснованной, но при этом практически полезным алгоритмом. Эвристика, в отличие от корректного алгоритма решения задачи, обладает следующими особенностями:

- Не гарантирует нахождение лучшего решения.
- Не гарантирует нахождение решения, даже если оно заведомо существует (возможен «пропуск цели»).
- Она может дать неверное решение в некоторых случаях.

Все эвристические методы можно условно разбить на три класса: эволюционные, стохастические и переборные (рисунок 38).



Рисунок 38 – Классификация эвристических методов

К переборным методам можно отнести метод ветвей и границ, метод локального поиска, метод распространения ограничений и другие. Известно, что все методы дискретной оптимизации основаны на переборе возможных вариантов решения и выборе из них лучшего в соответствии с заданным критерием оптимальности. Сущность всех методов оптимизации заключается в использовании целенаправленного перебора вариантов, при

котором движение к оптимуму (абсолютному экстремуму целевой функции) осуществляется за наименьшее число итераций. В случае непрерывных и гладких задач оптимизации наилучшее направление при движении к оптимуму совпадает с вектором-градиентом целевой функции [171]. Если же градиент не известен, то наилучшее направление ищется с помощью эвристик, основанных на дополнительных исследованиях задачи или знаниях экспертов.

Как известно, решение задач дискретной оптимизации полным перебором возможно, но на практике данный метод потребует слишком больших вычислительных ресурсов и времени. Методы неявного перебора позволяют сократить число возможных решений методом отсечения «неперспективных», по такому принципу работает *метод ветвей и границ*, создавая древовидную структуру, позволяющую последовательно делить область поиска на части. Для корректной работы метода необходимо оценить экстремальное значение целевой функции для каждого множества. Данный метод позволяет найти точное решение за меньшее количество итераций, по сравнению с полным перебором. В рассматриваемой задаче применение данного метода также не представляется возможным, ввиду отсутствия возможности оценить экстремальное значение целевых функций для множества.

Методы локального поиска являются одним из наиболее наглядных и естественных подходов к решению задач дискретной оптимизации. Высокая эффективность при решении NP-сложных задач и простота реализации открыли для них широкую дорогу к практическому использованию [172, 173]. Идея этих методов, несмотря на различие концепций, заключается в поиске локальных оптимумов, что в идейном смысле близко к нахождению стационарных точек в непрерывных задачах оптимизации с использованием необходимых условий Куна-Таккера [173]. Понятно, что использование этих условий, подразумевающих взятие производных, в комбинаторной

оптимизации не используется. Поэтому, проводя дополнительные исследования топологии целевой функции на множестве допустимых значений параметров оптимизации, выделяются подобласти, где осуществляется локальный поиск и находятся локальные экстремумы. Затем среди этих локальных экстремумов находится глобальный, который считается решением задачи.

Метод распространения ограничений (Constraints Propagation) обычно используется при решении задач дискретной оптимизации с большим числом ограничений типа равенств и неравенств. Сущность этого метода заключается в сужении допустимых интервалов изменения параметров оптимизации с помощью учета (распространения) заданных ограничений. В результате сужения допустимого множества X_D задачи (3.1) - (3.3) остается не слишком много возможных вариантов решения, которые поддаются полному перебору [174].

Следует отметить, что алгоритмы переборного типа без использования эвристик и/или декомпозиции модели не позволят решить задачу за приемлемое время.

Одним из ярких представителей стохастических методов является *метод Монте-Карло* [175]. Хотя этот метод основан на использовании случайных равномерно распределенных чисел (СРРЧ), он может эффективно применяться для решения детерминированных задач, т.е. задач, в постановке которых нет никаких случайных факторов. Метод Монте-Карло может эффективно применяться для решения задач дискретной оптимизации, т.е. задач, в которых требуется выбор лучшего из нескольких возможных вариантов решения. Решение задач оптимизации методом Монте-Карло в большинстве случаев основано на многократном случайном выборе вариантов решения и их сравнении. При достаточном количестве испытаний (т.е. вариантов решения,

выбранных случайным образом) находится решение, близкое к оптимальному, а в некоторых случаях - оптимальное.

Для многократного случайного выбора вариантов решения задачи применяются СРРЧ, получаемые, например, с помощью генератора случайных чисел. Из вариантов решений, выбранных случайным образом, отбирается лучший. Чтобы найти вариант решения, достаточно близкий к оптимальному, обычно требуется выбрать много вариантов решения (от нескольких десятков до тысяч). Поэтому применение метода Монте-Карло возможно только с использованием специальных программных средств.

Для решения задач оптимизации в настоящее время разработаны многочисленные *методы стохастического поиска*, основанные на марковских случайных процессах и подробно рассмотренные в работах [174].

Один из наиболее эффективных стохастических методов, разработанных в последнее время и успешно применяемых для решения задач дискретной оптимизации [176, 177, 178, 179, 180, 181, 182], который получил название «метод имитации отжига» (simulated annealing). Данный метод часто используется для решения задач многокритериальной оптимизации, и для определенных случаев существует доказательство сходимости (например, для двухкритериальной задачи).

Эволюционные методы основаны на технологии эволюционного моделирования, предложенной в середине 1970-х годов профессором Мичиганского университета Дж. Холландом на основе исследований эволюции жизни на Земле [183, 184]. Эволюционные методы начинают свою работу с создания целой популяции особей – кандидатов на решение рассматриваемой задачи. Отдельные особи популяции или их действия оцениваются по определенному критерию, позволяющему отобрать

лучшие, которые затем видоизменяются, наследуя наиболее эффективные свойства родителей или других представителей популяции. Эти методы предполагают поиск источника интеллекта в самом процессе эволюции и взаимодействия особей. Поэтому эти методы часто называют *интеллектуальными*, которые используют накопленные знания в процессе развития различных популяций или подчерпнутые из природы. Яркими представителями данного класса являются генетические алгоритмы, муравьиный алгоритм и метод роя частиц [185, 186, 187, 188, 189, 190, 191].

Подводя итог, существующие методы перебора и интеллектуальные методы способны решать предложенную задачу, однако большинство рассмотренных алгоритмов направлено на уменьшение возможных вариантов решения [192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200], а затем на поиск оптимального решения. Поэтому при решении конкретных задач оптимизации будут использованы различные методы. При этом, в том случае, когда возможных вариантов остается не очень много, задачу оптимизации можно свести к задаче многокритериального выбора на заданном множестве альтернатив. Сложность такого выбора заключается только в нечеткости критерия оптимальности. Поэтому должны использоваться экспертные системы, основанные на знаниях, или специальные индексы ранжирования, позволяющие сравнивать нечеткие множества и нечеткие числа и рассмотренные далее.

4.1. Математическая модель календарного планирования

Для решения исследуемой задачи оптимизации будут использоваться эвристические методы поиска оптимального решения. Эвристические методы, как правило, не дают точных решений задачи, однако с помощью этих методов удастся найти удовлетворительное решение за допустимое время вычисления.

Предлагается методика, позволяющая находить календарные планы производства, удовлетворяющие ограничениям задачи и близкие к

оптимальным. Методика представляет собой набор алгоритмов, последовательное выполнение которых позволяет отыскать близкий к оптимальному календарному плану, с учетом приоритетов, выставленных со стороны менеджмента предприятия. Данная методика позволяет учитывать приоритетность выполнения конкретных изделий и заказов и корректировки решения в процессе расчета.

Следует отметить, что предлагаемая методика учитывает все четыре критерия оптимальности календарного плана, более того учитывается нечеткое соотношение между критериями, что позволяет учитывать тот или иной критерий с определенным приоритетом.

Ниже приводится список этапов нахождения оптимального плана производства [201]:

1. Вычисление технологических весов изделий.
2. Сортировка списка изделий.
3. Алгоритм «движение к началу периода».
4. Алгоритм оптимизации плана производства

Рассмотрим эти этапы более подробно.

Вычисление технологических весов изделий

Технологическим весом изделия назовем суммарную трудоемкость, требуемую для изготовления изделия. При этом трудоемкость изготовления компонентов, которые есть на складе, при расчете технологического веса не учитывается. Таким образом, у двух одинаковых единиц ГП (готовая продукция) может быть разный технологический вес. В том случае, если часть компонентов, необходимых для изготовления изделия А есть на складе, возникает вопрос к какому из двух изделий А необходимо применить имеющиеся компоненты. Из двух изделий берется то, которое требуется выпустить раньше (если же выпуск изделий происходит в один день, то компоненты применяются к любому из этих изделий).

После вычисления технологических весов можно составить таблицу значений элементов входящих в ГКПП. Для каждого элемента (строки) известна следующая информация: номенклатурный номер изделия, технологический вес, плановая дата выпуска.

В дальнейшем технологический вес используется в задаче исключительно для ранжирования приоритетов изделий, поэтому при необходимости можно менять значения технологических весов изделий в таблице. Изменения должны быть минимальными и применяться только в том случае, когда необходимо повысить приоритет изделия; в противном случае в результате работы алгоритмов могут быть отклонения от оптимального значения календарного плана. В таблице 9 представлен пример заполнения таблицы значениями технологического веса каждого изделия

С технологическим весом изделия связаны следующие гипотезы:

Если два изделия должны быть выпущены в один день, то первым претендовать на свободные мощности должно изделие с большим технологическим весом. Предполагается, что чем меньше трудоемкость изготовления изделия, тем легче найти свободные мощности для его изготовления. Данное правило может иметь исключения. Для того чтобы учесть исключительные ситуации требуется экспертный опыт или же интеллектуальный элемент, который будет корректировать технологический вес исходя из условий работы системы.

Если в существующем плане два изделия должны, по каким-либо причинам, быть сдвинуты относительно друг друга (оптимизация загрузки оборудования и т.п.) то сдвинуто будет изделие с меньшим технологическим весом.

Таблица 9. Пример таблицы весов

Номер	Количество	Дата	Технологический вес
3	1	16.01.2009	2,63
3	1	16.01.2009	3,15
3	1	30.01.2009	3,15
5	1	16.01.2009	1,5
5	1	30.01.2009	1,5

Сортировка списка изделий

После получения таблицы технологических весов изделий, ее необходимо отсортировать по дате выпуска и по убыванию технологического веса. Если дата планируемого выпуска у всех изделий одинаковая, то таблица сортируется по убыванию веса изделия. Таким образом, получаем таблицу запуска, порядок строк в которой, будет определять, в каком порядке будут планироваться выпуски изделий. Пример такой таблицы представлен в таблице 10.

Таблица 10. Отсортированная таблица весов

Номер	Количество	Дата	Технологический вес
3	1	16.01.2009	3,15
3	1	16.01.2009	2,63
5	1	16.01.2009	1,5
3	1	30.01.2009	3,15
5	1	30.01.2009	1,5

Алгоритм поиска допустимого решения

Для работы данного алгоритма требуется таблица выпуска изделий и входящая информация о задаче. В качестве основы работы программного

алгоритма был взят эмпирический алгоритм планирования производства «с конца», т.е. строится план исходя из логики «для того, чтобы... нужно...». Данный алгоритм достаточно прост для понимания. Сущность алгоритма следующая – последовательно выбираются строки из таблицы выпуска изделий. Затем выпуск изделия планируется на дату выпуска. Планируются все операции, которые необходимо выполнить для выпуска изделий. Если изделие состоит из изготавливаемых компонентов, то далее необходимо запланировать выпуск этих компонентов. При этом крайним сроком изготовления будет дата выполнения первой операции предыдущего изделия. На рисунке 39 изображен алгоритм работы модуля планирования. Он состоит из следующих действий:

1. Последовательно выбираем элементы из таблицы запуска.
2. Выбираем элемент i , устанавливаем значение номера смены d равным дате выпуска элемента i .
3. Выбираем последнюю операцию n в технологическом этапе изготовления компонента i .
4. Пытаемся запланировать операцию на d день.
5. Проверяем по имеющимся мощностям – нагрузка на данный тип оборудования в этот день не должна превышать максимально допустимую нагрузку.
 - a. Да – переходим к следующему этапу.
 - b. Нет – устанавливаем $d=d-1$ и переходим на шаг 4.
6. Проверяем общую длительность операций, запланированных на текущий день, она должна быть меньше длительности рабочего дня.
 - a. Да – переходим к следующему пункту.
 - b. Нет – устанавливаем $d=d-1$ и переходим на шаг 4.
7. Планируем в d день n -ную операцию технологического этапа. При этом увеличивая текущую загрузку мощностей на d день.

8. Проверяем номер текущей операции, является ли она первой операцией ТЭ.
 - a. Да – переходим к следующему пункту.
 - b. Нет – выбираем предыдущую операцию в ТЭ $n=n-1$ и переходим на шаг 4.
9. Проверяем необходимость изготовления предварительно изготовления других компонент для текущей компоненты.
 - a. Да – для каждого элемента i , входящего в список необходимых компонентов выполнить шаги, начиная с 3.
 - b. Нет – переходим к следующему пункту.
10. Проверяем, является ли данный элемент последним в таблице запуска.
 - a. Да – конец алгоритма.
 - b. Нет – выбираем следующее i в таблице запуска и переходим к шагу 2.

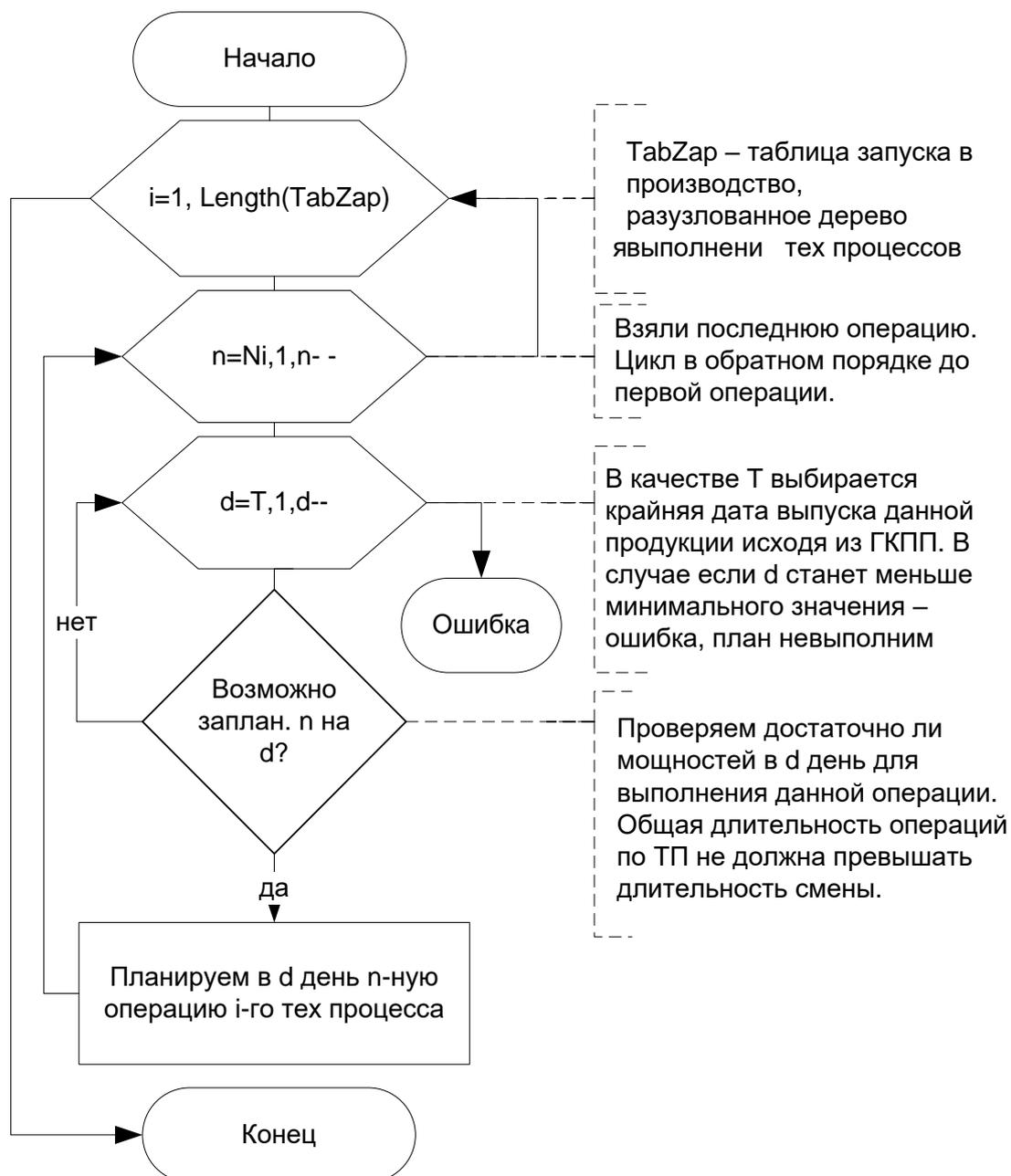


Рисунок 39 – Алгоритм «движение к началу периода»

Данный алгоритм позволяет найти допустимый план производства, либо же убедиться в том, что план производства невыполним в текущих условиях.

В случае если план производства является невыполнимым, план производства будет расширен на отрицательную часть оси времени (под «отрицательной» датой понимается значение даты, предшествующее началу планового периода), на которой и будет продолжен процесс

обратного планирования. Получив невыполнимый план производства, ответственные менеджеры смогут увидеть конкретные детали, изготовление которых запланировано на отрицательные даты. Существует, как минимум, четыре варианта выхода из ситуации:

1. Закупка требуемых компонентов у сторонних производителей.
2. Экстренное изготовление требуемых компонентов до начала планового периода.
3. Изменение графика отгрузки готовой продукции потребителям. Даты отгрузки продукции переносятся на некоторый период времени в будущее. Периодом в данном случае будет количество «отрицательных» дней, использованных в текущем плане производства. После этого следует заново запустить алгоритм поиска допустимого решения.
4. Изменение рабочего графика рабочих центров с максимальной загрузкой. Такое изменение может быть сделано несколькими способами: продлением рабочей смены для работников, введением дополнительной рабочей смены, увеличением количества работников и оборудования на данном направлении. После внесения такого рода изменений следует заново запустить алгоритм поиска допустимого решения.

Если в план производства не попали «отрицательные» даты, значит, получен допустимый план производства, который может быть выполнен в текущих условиях.

Отметим, что полученный план производства будет являться близким к оптимальному по критерию «максимальная скорость выполнения плана». Такое свойство плана напрямую следует из логики построения – операции планируются максимально близко друг к другу, достигая максимальной интенсивности производства. Количество дней, на которые запланирована хотя бы одна операция, можно считать минимальным периодом выполнения

текущего плана. Для полученного плана производства характерной чертой является максимальная загрузка оборудования перед датами отгрузки и малая загрузка оборудования в начале периода. Это свойство также напрямую следует из логики формирования плана. Алгоритм планирует производство, двигаясь к началу периода от дат отгрузки, загрузка оборудования перед датой отгрузки будет всегда близка к максимальной. Однако очевидно, что интенсивность загрузки оборудования будет постепенно уменьшаться при движении к началу периода. В итоге на начало периода будут запланированы только изделия, имеющие самые длинные технологические цепочки.

Приведем тестовый пример, демонстрирующий работу данного алгоритма. Рассмотрим простейший случай: производство одного вида продукции на нескольких станках; готовая деталь производится из заготовки; процесс производства детали представляет собой единый технологический процесс, выполняющийся в рамках одного цеха; для изготовления детали необходимо выполнить последовательно шесть операций. Для каждой операции определены трудоемкость и вид оборудования, на котором она выполняется (таблица 11). В наличии имеется три различных станка (станок 1, станок 2, станок 3).

Таблица 11. Параметры операций

	Оборудование	Трудоемкость (смен)
Операция 1	Станок 1	0,25
Операция 2	Станок 1	0,25
Операция 3	Станок 2	0,25
Операция 4	Станок 2	0,25
Операция 5	Станок 3	0,1
Операция 6	Станок 3	0,2

Требуется выпустить 5 деталей к 5-му дню и еще 5 деталей к 10-му дню производственного цикла. После выполнения алгоритма поиска допустимого решения был найден план производства (таблица 12), который позволяет произвести продукцию с соблюдением всех ограничений задачи. Значения таблицы показывают, сколько операций данного вида выполняются в определенный день.

Таблица 12. Допустимый план производства продукции

опер/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Операция 1		1	2	2			1	2	2	
Операция 2		1	2	2			1	2	2	
Операция 3	1	2	2			1	2	2		
Операция 4	1	2	2			1	2	2		
Операция 5	3	2				3	2			
Операция 6	3	2				3	2			

На основании заданного плана производства построена таблица загрузки оборудования (Таблица 13).

Таблица 13. Загрузка оборудования по дням

Станок/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Станок 1	0	0,5	1	1	0	0	0,5	1	1	0
Станок 2	0,5	1	1	0	0	0,5	1	1	0	0
Станок 3	0,9	0,6	0	0	0	0,9	0,6	0	0	0
Средняя загрузка	0,47	0,7	0,67	0,33	0	0,47	0,7	0,67	0,3	0

Легко убедиться, что план производства является допустимым. В заданных условиях он также является достаточно эффективным. Это объясняет, почему APS системы (используют аналогичный алгоритм нахождения производственного плана) получили широкое распространение на крупных машиностроительных предприятиях.

Алгоритм оптимизации плана производства

Данный алгоритм проводит оптимизацию допустимого плана производства с учетом основных критериев: комфортность, минимизация рисков и равномерность производства. Очевидно, что данные критерии могут вступать друг с другом в противоречия, поэтому перед началом требуется задать параметр максимального опережения выпуска и важность критериев оптимизации [41].

Для оптимизации плана производства по критерию комфортности, необходимо сгруппировать операции одного вида по дням, чтобы максимально увеличить партионность, и уменьшить число переналадок оборудования. Данная постановка задачи не учитывает время на переналадку оборудования, закладывая это время лишь как статистическую величину. Таким образом, крайне важно, чтобы количество переналадок было как можно меньше, необходимо сгруппировать одинаковые операции так, чтобы они выполнялись как можно большей партией.

Для минимизации рисков срыва плана производства необходимо скомпоновать план таким образом, чтобы в $\tau/2$ областях от дат отгрузки продукции была минимальная загрузка оборудования, а основные трудоемкие операции были удалены от крайней даты выпуска на некоторое количество дней, но не более, чем τ .

Для оптимизации плана производства по критерию равномерности производства требуется выявить дни с разнородной загрузкой оборудования и сбалансировать нагрузку так, чтобы при переходе между днями изменения нагрузки по каждому виду оборудования были бы минимальны.

Для оптимизации плана производства по критерию минимальности срока выполнения ГКПП необходимо последовательно перенести максимальное количество нагрузки на более ранние даты. Перепланирование должно быть итерационным. В итоге весь план должен быть сдвинут влево на максимально-возможное число дней.

Выше отмечалось, что допустимый план производства, полученный алгоритмом поиска допустимого решения, перегружен перед датами отгрузки и имеет малую загрузку в начале периода. Поэтому был разработан эмпирический алгоритм оптимизации, согласно которому при движении от начала планового периода последовательно производит перепланирование операций на более ранние дни. Для каждой операции вычисляются даты, на которые возможно перепланировать текущую операцию. Затем из множества дат выбирается одно, которое удовлетворяет следующим требованиям:

Значение даты удалено от текущей даты не более чем на τ рабочих дней.

Для каждой даты рассчитываются изменения комплексного критерия оптимизации. Приоритет получает дата с наилучшим изменением критерия.

На рисунке 40 изображен алгоритм работы модуля планирования. Он состоит из следующих действий:

1. На входе имеем план производства, построенный с конца, матрицу баланса, информацию о загрузке оборудования. Устанавливаем $i=1$.

2. Устанавливаем $l = s_i$

3. Просматриваем матрицу баланса с целью выяснения дня tk^* , когда все необходимые компоненты появляются на складе. При этом это значение не может превышать значение τ . Таким образом, получаем множество значений $tk = \{d - tk^*, \dots, d\}$, в каждый из которых можно будет выполнить операции.

4. Среди элементов tk выбираем значение максимально подходящее под требования задачи.

5. Проверяем, позволяет ли оборудование соединить два элемента плана, т.е. выполнены ли все предшественники данной операции до текущего времени tk .

- a. Да – переходим к следующему пункту.
 - b. Нет – удаляем текущее значение из множества tk и переходим на шаг 4.
- 6. Переносим значение P_{ld} в ячейку $P_{l,d-tk}$. Пересчитываем матрицу b .
- 7. Проверяем, не является ли текущая операция последней в технологическом этапе $l = s_i - 1$.
 - a. Да – переходим к следующему пункту.
 - b. Нет – $l = l + 1$ и переходим на шаг 5.
- 8. Проверяем, является ли данный технологический этап последним в списке ($s_{i+1} = W$).
 - a. Да – переходим к следующему пункту.
 - b. Нет – $i = i + 1$ и переходим на шаг 2.
- 9. Проверяем, является ли текущее значение d равно T ($d = T$).
 - a. Да – конец работы алгоритма.
 - b. Нет – $d = d + 1, i = 1$ и переходим на шаг 2.

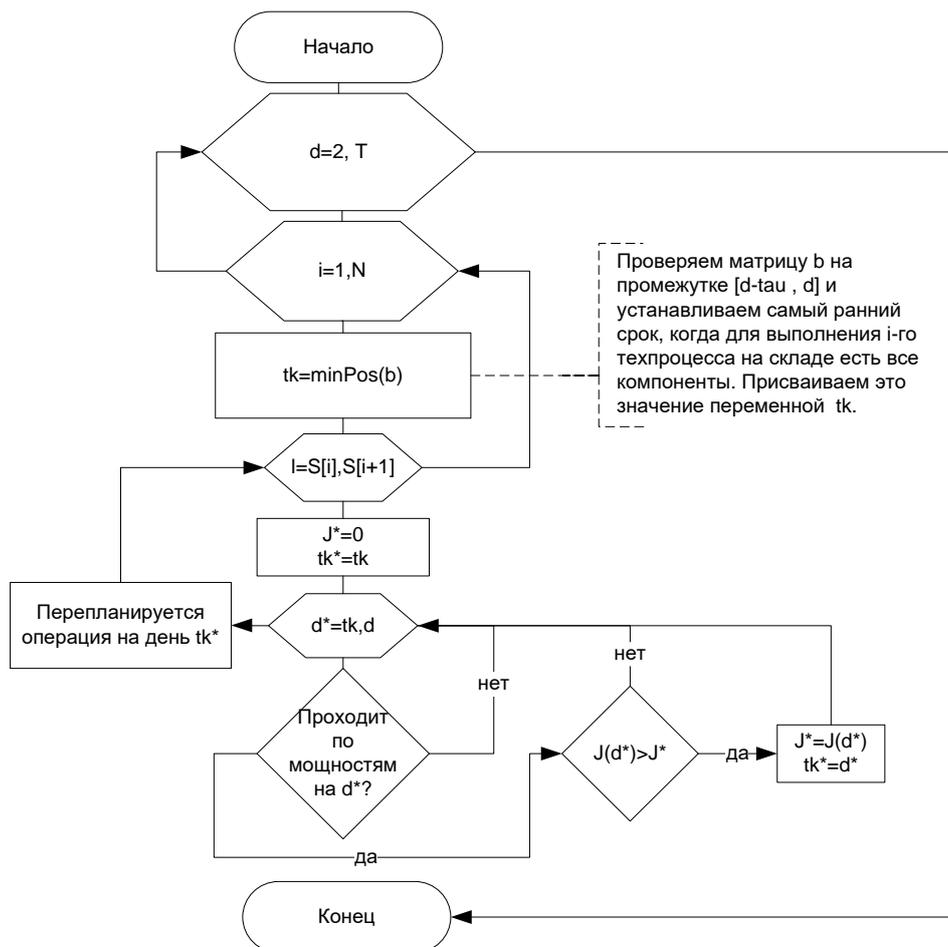


Рисунок 40 – Алгоритм оптимизации плана производства

В результате получаем план, оптимизированный по комплексному критерию оптимизации. Приоритет в составлении плана отдается основному критерию оптимальности, установленному экспертами. Стоит заметить, что эффективность метода сильно зависит от τ ; для получения оптимального плана производства рекомендуется оставлять данный параметр значением по умолчанию.

Приведем тестовый пример, демонстрирующий работу данного алгоритма. Рассмотрим производство одного вида продукции на нескольких станках. Готовая деталь производится из заготовки, процесс производства детали представляет собой единый технологический процесс, выполняющийся в рамках одного цеха. Для изготовления детали необходимо выполнить последовательно шесть операций. Для каждой операции определены трудоемкость и вид оборудования, на котором она

выполняется (таблица 14). В наличии имеется три различных станка (станок 1, станок 2, станок 3).

Таблица 14. Параметры операций

	Оборудование	Трудоемкость (смен)
Операция 1	Станок 1	0,1
Операция 2	Станок 1	0,1
Операция 3	Станок 2	0,1
Операция 4	Станок 2	0,1
Операция 5	Станок 3	0,1
Операция 6	Станок 3	0,1

Требуется выпустить 10 деталей к 5-му дню и еще 10 деталей к 9-му дню производственного цикла. После выполнения алгоритма поиска допустимого решения был найден план производства (таблица 15), который позволяет произвести продукцию с соблюдением всех ограничений задачи. Значения таблицы показывают, сколько операций данного вида выполняются в определенный день.

Таблица 15. Допустимый план производства продукции

опер/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Операция 1			5	5			5	5		
Операция 2			5	5			5	5		
Операция 3		5	5			5	5			
Операция 4		5	5			5	5			
Операция 5	5	5			5	5				
Операция 6	5	5			5	5				

На основании заданного плана производства построена таблица загрузки оборудования (Таблица 16).

Таблица 16. Загрузка оборудования по дням

Станок/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Станок 1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0

Станок 2	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
Станок 3	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
Средняя загрузка	0,33	0,67	0,67	0,33	0,33	0,67	0,67	0,33	0	0

Также рассчитан показатель комфортности, который равен 24/54 (0.44).

Допустимый план производства был оптимизирован с помощью алгоритма оптимизации плана производства. При этом главным критерием был выбран критерий комфортности (остальные критерии не использовались). Максимальное опережение производства τ было выбрано равным 9, т.е. было разрешено производить продукцию с произвольным опережением по времени. После этого был получен план производства, который представленный в таблице 17.

Таблица 17. «Комфортный» план производства

опер/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Операция 1			5	5				10		
Операция 2			5	5			10			
Операция 3		5	5			10				
Операция 4		5	5		10					
Операция 5	5	5		10						
Операция 6	5	5	10							

На основании «комфортного» плана производства была построена таблица загрузки оборудования (Таблица 18).

Таблица 18. Загрузка оборудования по дням

Станок/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Станок 1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
Станок 2	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
Станок 3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Средняя загрузка	0,33	0,67	1	0,67	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0

Теперь показатель комфортности равен $18/54$ или (0.33) , т.е. критерий комфортности улучшен на 25%.

Проанализировав результаты оптимизации плана легко заметить, что первая часть производственного плана (выпуск до 5-го дня) осталась без изменения. Это произошло потому, что данная часть плана является единственно возможной, в противном случае будут допущены срывы сроков поставки. Вторая часть плана изменилась достаточно сильно. Все операции одного вида сгруппированы таким образом, чтобы выполняться в один день. При этом срок выпуска изделия не изменен и занимает такое же количество дней. Средняя загрузка оборудования также изменилась, середина планового периода является наиболее интенсивной, а последние дни планового периода загружаются только на треть, что свидетельствует о том, что данный план производства является оптимальным по критерию комфортности производства.

В заключение примера приведем план производства, полученный при выборе в качестве главного, критерия минимальности срока производства. Этот план представлен в таблице 19.

Таблица 19. «Кратчайший» план производства

опер/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Операция 1			5	5				10		
Операция 2			5	5			10			
Операция 3		5	5			10				
Операция 4		5	5		10					
Операция 5	5	5		10						
Операция 6	5	5	10							

На основании «кратчайшего» плана производства была построена таблица загрузки оборудования (Таблица 20).

Таблица 20. Загрузка оборудования по дням

Станок/день	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Станок 1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
Станок 2	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
Станок 3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Средняя загрузка	0,33	0,67	1	0,67	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0

Проанализировав результаты оптимизации плана по критерию минимального срока производства легко заметить, что в данном случае вторая часть производственного плана просто сдвинута влево на две рабочие смены. Однако по критерию минимизации срока производства продукции данный план, безусловно, является оптимальным. Загрузка оборудования в точности соответствует по средним показателям загрузке оборудования «комфортного плана».

Подводя итог, примера можно отметить, что алгоритм позволяет оптимизировать план производства с учетом заявленных критериев.

4.2. Математическая модель синхронизации производственных процессов

Рассмотрим простой пример, наглядно демонстрирующий принцип работы синхронизированной системы управления производством в условиях постоянно меняющихся условий производства.

Пусть производство состоит из пяти производственных участков. На рассматриваемый момент необходимо выполнить два заказа с одинаковым приоритетом на два типа изделий (Изделие А и Изделие В) по 5 единиц каждого типа.

Оба заказа должны быть отгружены на 10-й неделе, а за срыв срока отгрузки предусмотрены пени, в размере 3% стоимости контракта за каждую неделю задержки. Для наглядности допустим, что стоимость изделий «А» и «В» одинакова. Также допустим, что плановая прибыльность заказов составляет 20% от стоимости изделий.

Планы производства были рассчитаны в ERP-системе, но поступление материалов произошло с опозданием, что привело к позднему запуску производства.

Изделие «А» обрабатывается на участках 1, 3, 4. Изделие «В» обрабатывается на участках 2, 3, 5. Время обработки на каждом участке одинаково и составляет одну неделю. На каждом участке в один момент времени может обрабатываться только одно изделие. На начальном этапе незавершенное производство отсутствует.

Для начала рассмотрим стандартную работу производства с заранее известным планом производства. На рисунке 41 представлена работа производства в течении первых трех недель, слева от цехов отображается остатки заготовок изделий, справа количество выпущенных изделий «А» (Участок 4) и В (Участок 5). Сверху над участками отображается количество изделий «А» находящихся на участке, снизу под участками отображается количество изделий «В» находящихся на участке. В участке номер 3 дополнительно отображается, какое изделие на текущей неделе обрабатывается «А» или «В».

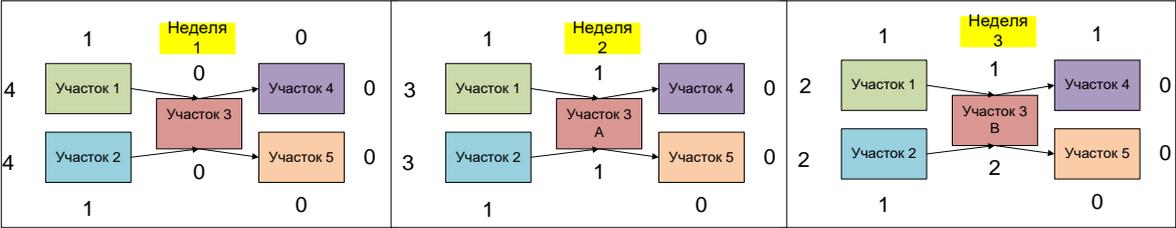


Рисунок 41 – Первые три недели работы производства

На первой неделе участки 1 и 2 начинают производство, остальные участки вынужденно простаивают. На второй неделе два полуфабриката «А» и «В» поступают на Участок 3. Поскольку оба заказа идут не по графику и имеют одинаковый приоритет, к производству на участке 3 принимается полуфабрикат «А».

На третьей неделе полуфабрикат «А» начинает обработку на участке 4, еще два полуфабриката поступают на участок 3. Теперь на участке 3 уже 3 полуфабриката и начальнику участка следует выбрать какой из трех полуфабрикатов следует обрабатывать. В данном примере мы рассмотрим вариант, когда в целях соблюдения ритмичности производства, начальник участка решает сбалансировать производство и чередовать изделия «А» и «В». В реальной ситуации, оценив, что переналадка занимает время, начальник участка мог бы принять решение об увеличении партии обработки и снова выбрать полуфабрикат «А», который как раз есть в наличии. Это бы только усугубило описываемую ниже ситуацию.

Далее рассмотрим, как происходило производство на неделях 4-6 (рисунок 42).

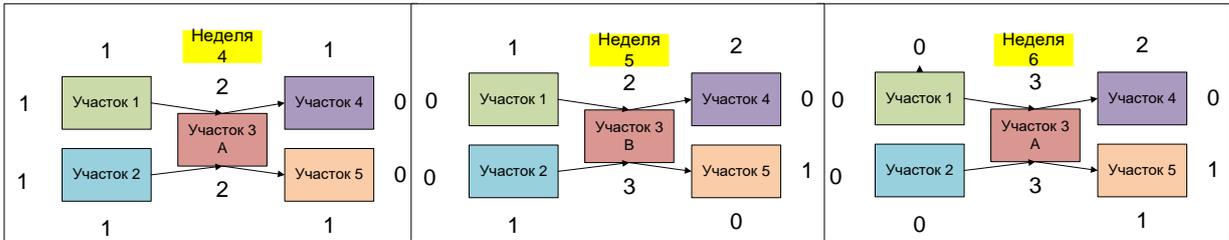


Рисунок 42 – Работа производства на неделях 4-6

Допустим, что на участке №4 возникли некоторые организационные задержки, которые привели к тому, что на неделе 4 (забегая вперед, это продлится до недели №8), изделие «А» так и не было выпущено. Как правило, эта информация даже не доводится до подразделений смежников, которые продолжают работать согласно действующим планам производства.

Участки 1 и 2 продолжают запускать производство изделий каждую неделю, количество незавершенных изделий на участке 3 постоянно увеличивается. На 5-й неделе осуществляется выпуск изделия «В».

На рисунке 43 представлена информация о завершающих периодах производства:

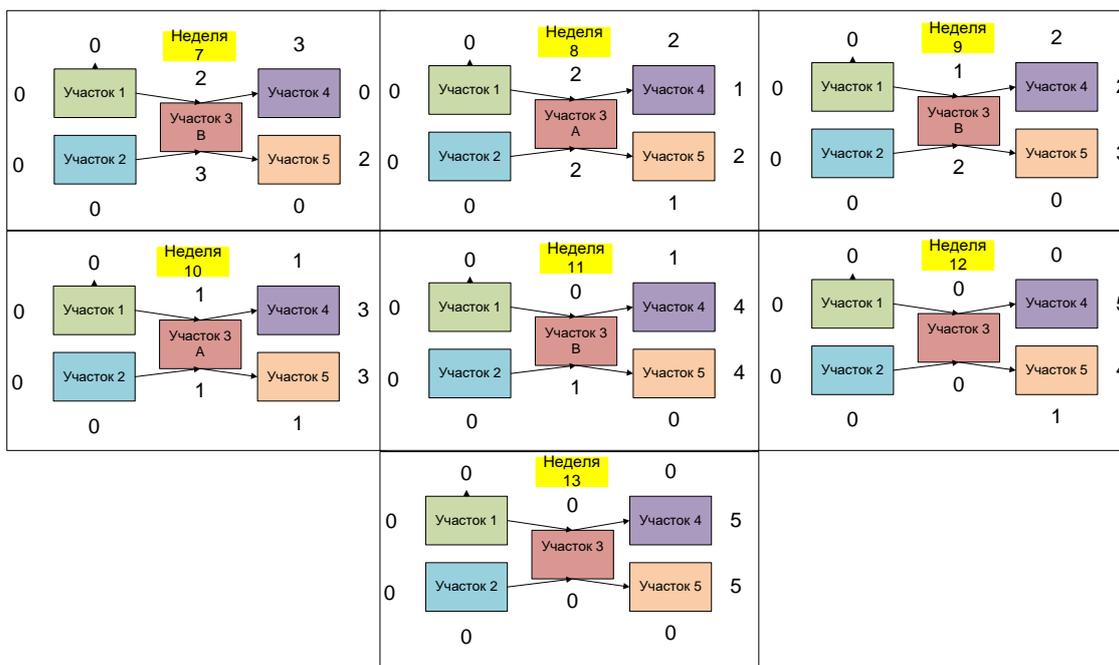


Рисунок 43 – Завершение выполнения заказов

Начиная с 8-й недели, участок №4 начинает планомерно выпускать изделие за изделием каждую неделю и благодаря избытку мощностей на участках №4 и №5 уже на 12-й неделе завершается выполнение заказа изделий «А» и на 13-й неделе завершается выполнение заказа на изделие «В». По итогам завершения работ заказчиком были предъявлены пени по заказу изделий «А» в размере 6% от стоимости заказа, а по заказу изделий «В» в размере 9% от стоимости заказа, что привело к снижению прибыли от заказов на 37,5% от планового значения прибыльности.

Теперь рассмотрим, как в этой же ситуации работала бы синхронизированная система управления производством (5) - (8). У каждого участка есть по одной карточке синхронизации с участком-потребителем. Решение задачи (5) - (8) становится тривиальным, так как выполнение ограничений, накладываемых на систему, делает допустимым на каждом

шаге лишь одно решение. Эта ситуация является прямым следствием упрощений, введенных в демонстрационный пример.

На рисунке 44 представлена работа производства в первые три недели. Разница заметна уже на неделе №2. Ввиду того, что на участке №3 уже есть изделие «В» – участок №2 на второй неделе простаивает и лишь на неделе №3, когда на участке №3 начинается обработка полуфабриката «В» на участке №2 завершается обработка полуфабриката «В».

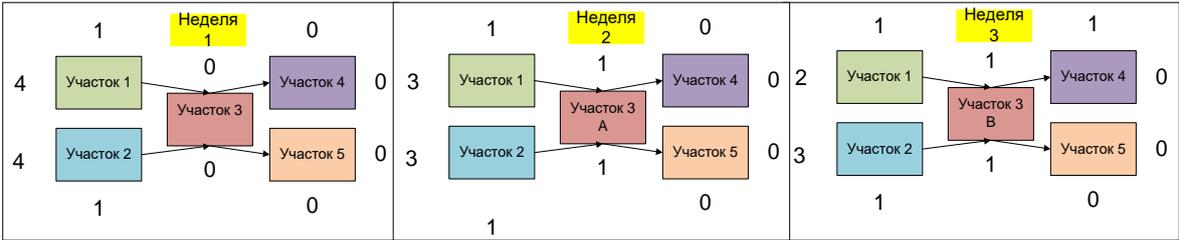


Рисунок 44 – Синхронизированная система в первые три недели

Далее рассмотрим, как происходило производство на неделях 4-6 (рисунок 45).

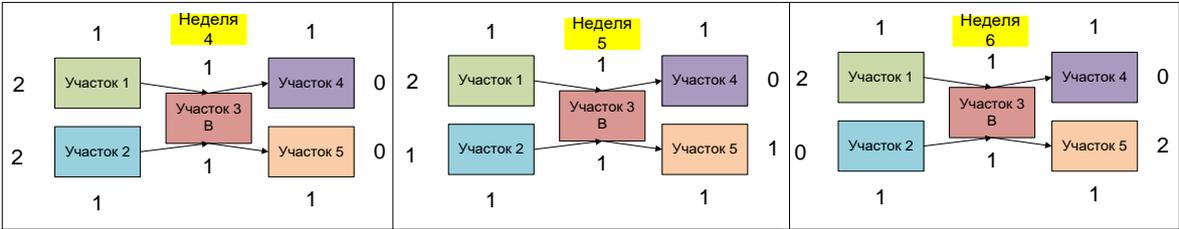


Рисунок 45 – Работа производства на неделях 4-6

Цепочка по производству изделия «А» вынужденно простаивает, потому что нет свободных карт синхронизации – участок №4 не выпускает продукции. По этой же причине участок №3 обрабатывает только изделия «В». На первый взгляд картины производства не сильно отличаются друг от друга.

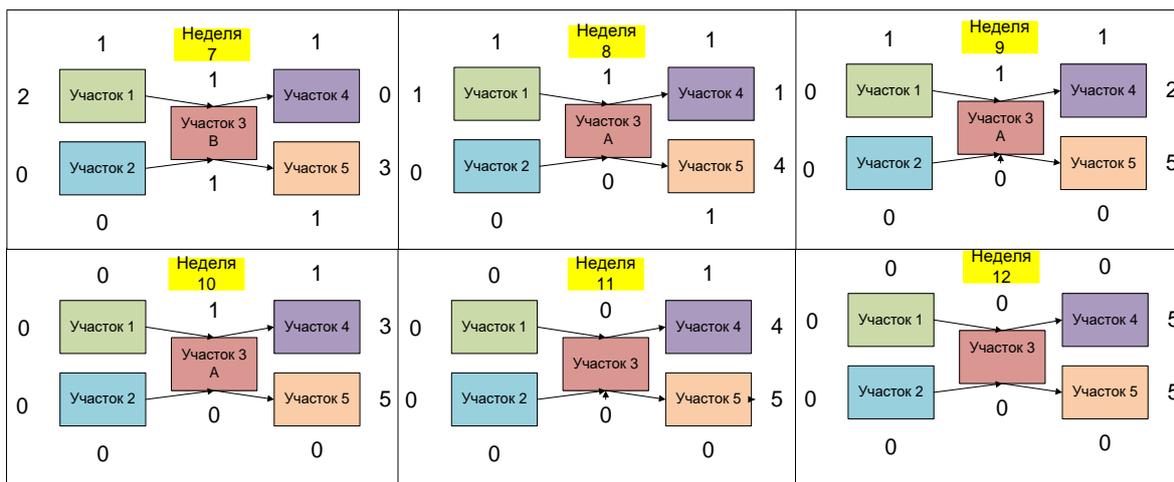


Рисунок 46 – Завершение выполнение заказов в синхронизированной системе

На рисунке 46 представлены итоговые результаты работы синхронизированной системы управления производством. Первым и самым очевидным результатом работы системы является то, что производство завершилось на неделю раньше. Если смотреть внимательнее, то видно, что производство изделия «В» завершилось на 9-й неделе, что на четыре недели раньше, чем в предыдущем примере и не нарушает срок, оговоренный в контракте.

При использовании синхронизированной системы управления производством заказчиками были предъявлены пени по заказу изделий «А» в размере 6% от стоимости заказа. Прибыль от реализации двух заказов снизилась на 10% от планового значения. В сравнении с первым случаем, удалось **сократить убыток почти в четыре раза!** Полученная прибыль от выполнения заказов **на 30% выше**, чем без применения синхронизированной системы управления.

Возможно, тестовый пример может показаться надуманным, однако анализ практической работы реальных производственных предприятий показывает, что в аналогичных ситуациях, результаты работы, как правило, еще хуже.

Рассматривая результаты применения синхронизированного подхода к управлению производством, мы рассмотрели только прямые следствия. Если оценить уровень незавершенного производства, и время и количество замороженных средств то станет очевидно, что применение синхронизированной системы управления позволяет со временем снизить и другие прямые и косвенные затраты, что еще более позитивно отразится на чистой прибыли предприятия.

Пример с использованием модели синхронизации

Рассмотрим еще один пример, наглядно демонстрирующий принцип работы синхронизированной системы управления производством в условиях постоянно меняющихся условий производства. Для объективного моделирования процессов производства будем использовать программное обеспечение «Plant Simulation» от компании «Siemens PLM Software».

Пусть производство состоит из шести производственных участков (см. рисунок 47). 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 (полтора месяца), а за срыв срока отгрузки предусмотрены пени, в размере 3% стоимости контракта за каждую неделю задержки. Для наглядности допустим, что стоимость «ДСЕ1» и «ДСЕ2» одинакова. Также допустим, что плановая прибыльность заказов составляет 20% от стоимости изделий.

Планы производства были рассчитаны в ERP-системе, но поступление материалов произошло с опозданием, что привело к позднему запуску производства.

Пусть «ДСЕ1» обрабатывается на участках 1, 3, 4, 6, а «ДСЕ2» – на участках 2, 3, 5, 6. Время обработки на каждом участке одинаково и составляет 40 минут (60 штук в неделю). На каждом участке в один момент

времени может обрабатываться только одно изделие. На начальном этапе, незавершенное производство отсутствует.

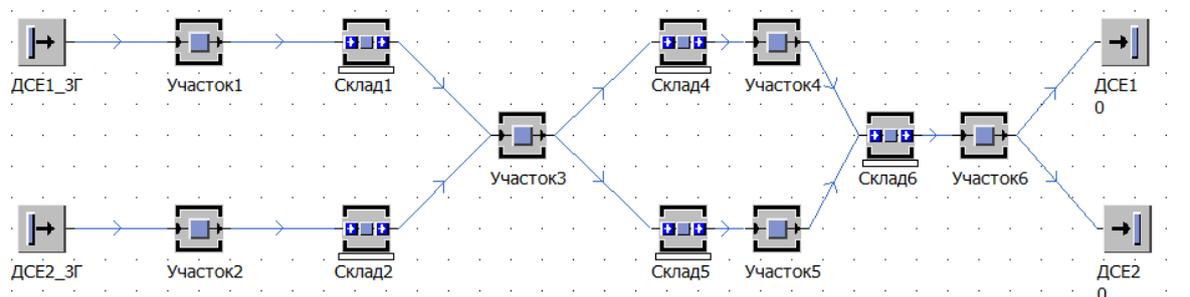


Рисунок 47 – Схема производства

Кроме того, 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 21 Простой оборудования

Участок / количество простоя дней	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. Поскольку производство происходит с опозданием, участки №1 и №2 стараются максимально быстро выполнить заказы, непрерывно запуская в работу заготовки «ДСЕ1» и «ДСЕ2», а результаты работы передаются на промежуточные склады «Склад1» и «Склад2», где хранятся в ожидании начала обработки на участке №3.

Таким образом, участок №3 имеет на входе заведомо избыточное количество полуфабрикатов «ДСЕ1» и «ДСЕ2». Допустим, что начальник участка принял сбалансированное решение и решил поочередно обрабатывать «ДСЕ1» и «ДСЕ2». Отметим, что начальник участка мог бы принять решение об увеличении партии обработки (вплоть до размера заказа), что приведет только к ухудшению конечного результата (предлагается проверить самостоятельно). Участок №3 передает результаты работы на склады №4 и №5, где полуфабрикаты находятся в ожидании обработки на участках №4 и №5 соответственно.

После обработки на участках №4 и №5 полуфабрикаты попадают на участок №6 для финальной обработки и подготовки к отгрузке.

На рисунке 48 представлена работа производства через одну неделю. На выходах отображается количество выпущенных «ДСЕ1» и «ДСЕ2» (18 и 24 соответственно). В участках №3 и №6 дополнительно отображается, какое изделие на текущий момент обрабатывается. Несмотря на простои оборудования участка №4 – перед участком №6 образовался склад полуфабрикатов, позволяющий оптимально загрузить узкое место – участок №6.

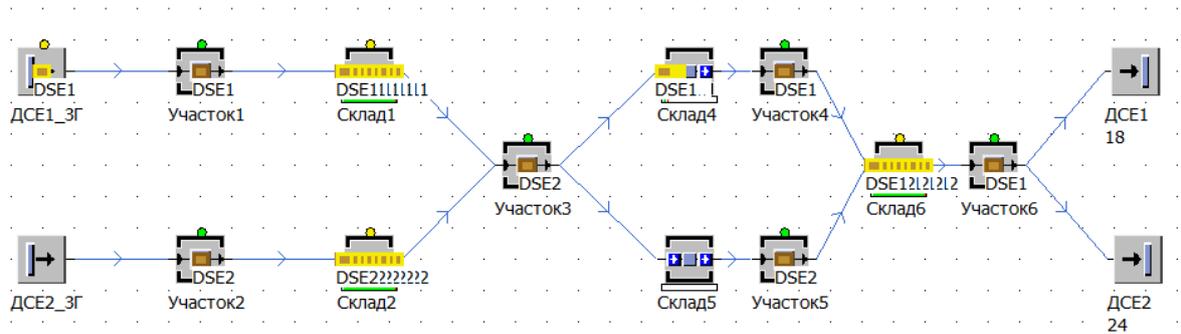


Рисунок 48 – Классическое производство через неделю после начала

На рисунке 49 представлена работа производства через две недели. Ввиду простоя оборудования перед участком №5 образовалась очередь, а участок №4 недогружен.

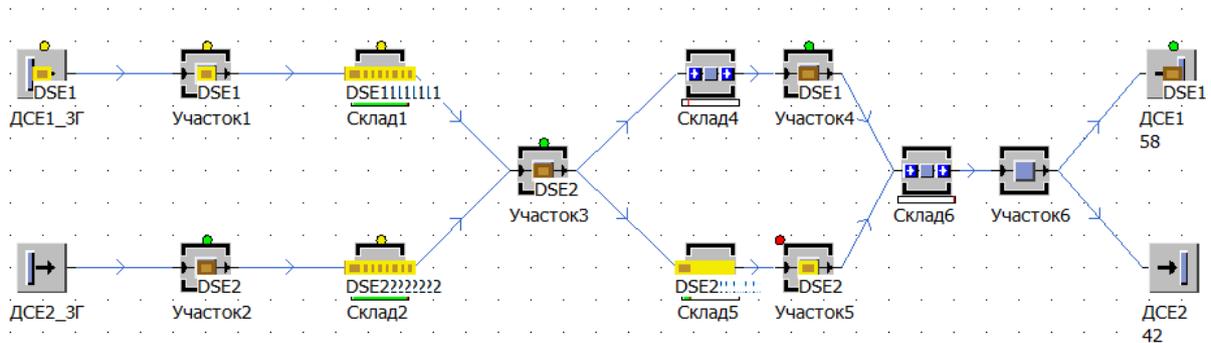


Рисунок 49 – Классическое производство через две недели после начала

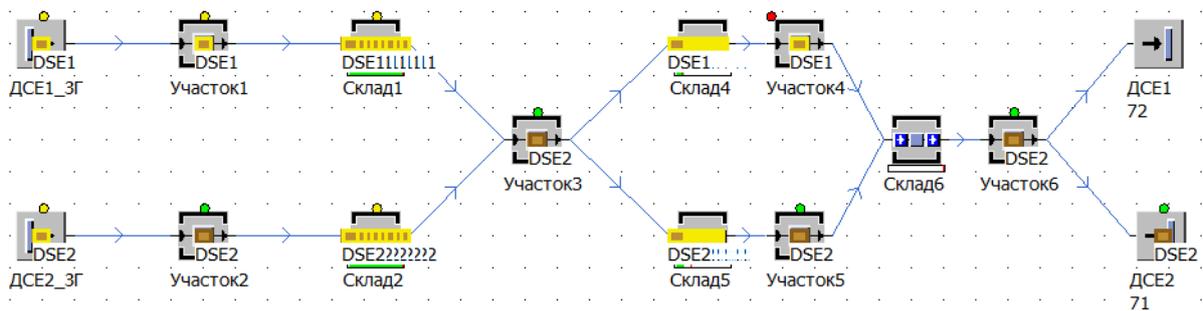


Рисунок 50 – Классическое производство через три недели после начала

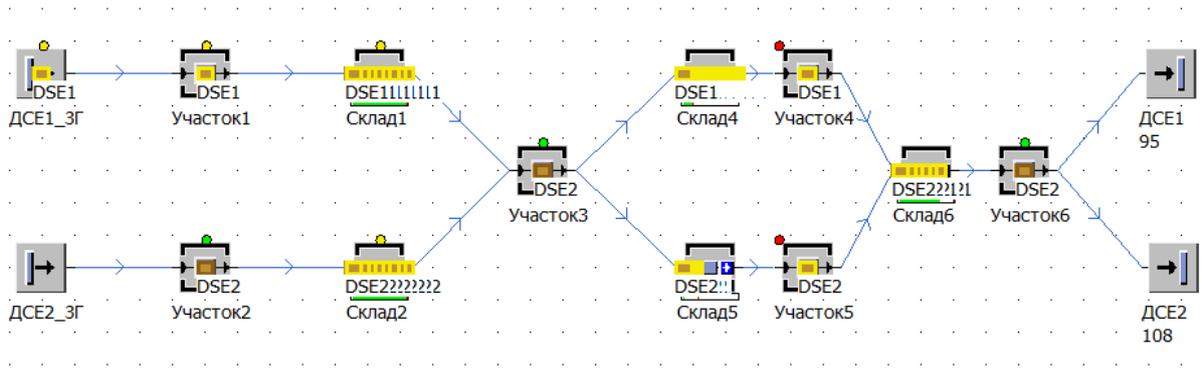


Рисунок 51 – Классическое производство через четыре недели после начала

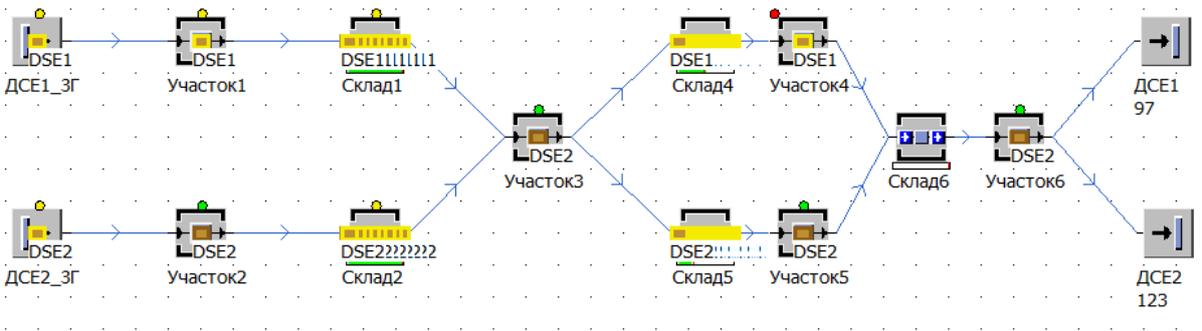


Рисунок 52 – Классическое производство через пять недель после начала

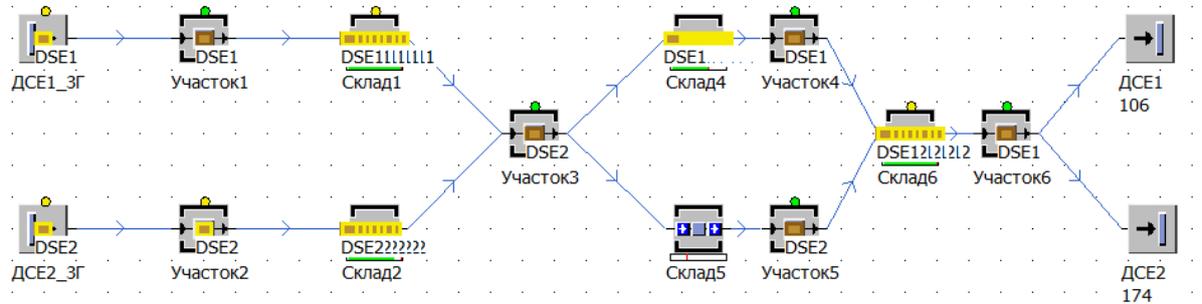


Рисунок 53 – Классическое производство через шесть недель после начала

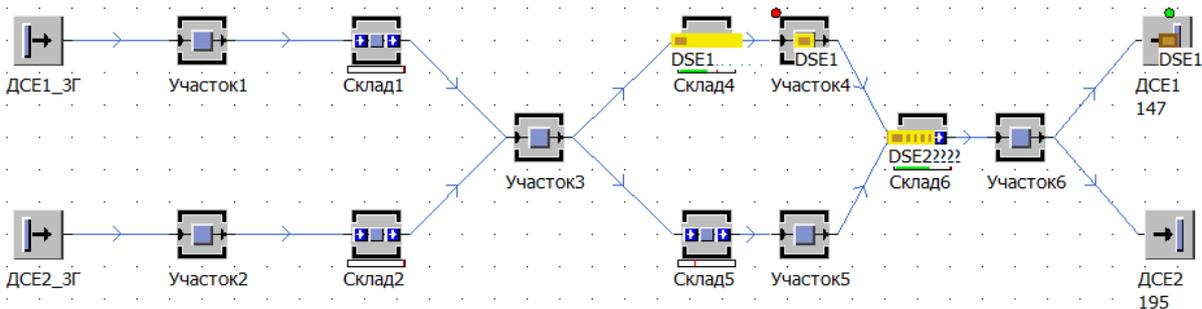


Рисунок 54 – Классическое производство через семь недель после начала

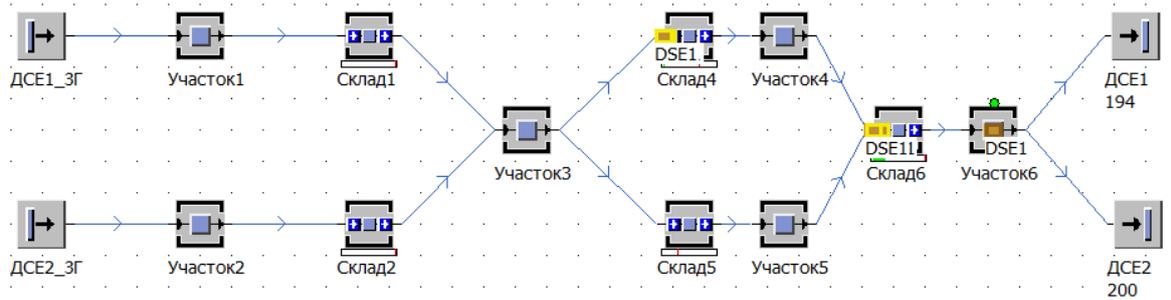


Рисунок 55 – Классическое производство в последний рабочий день восьмой недели

Теперь рассмотрим, как в этой же ситуации работала бы синхронизированная система управления производством. У каждого участка есть по одной карточке синхронизации с участком потребителем – самый простой случай. Сроки и приоритетность заказов одинаковая, поэтому решение задачи оптимизации выбора партии обработки становится тривиальной.

На рисунке 56 представлена работа производства после первой недели. За первую неделю произведено 54 изделия (против 42 в первом случае), что фактически соответствует теоретическому максимуму и на 30% больше, чем в первом случае.

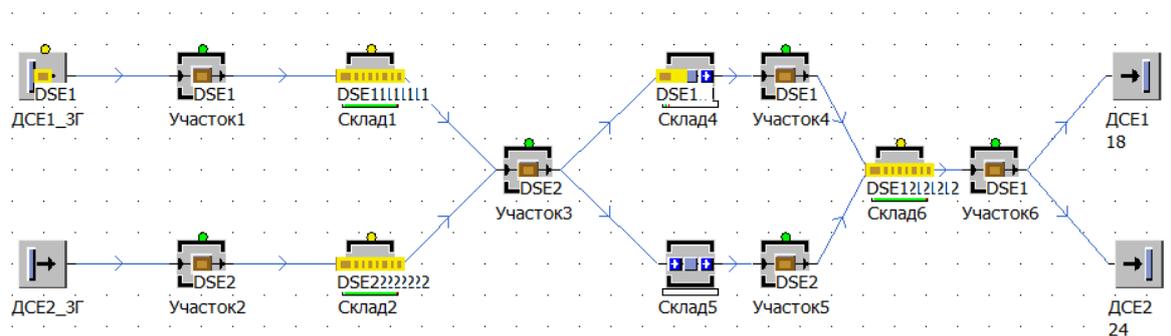


Рисунок 56 – Синхронизированное производство через неделю после начала

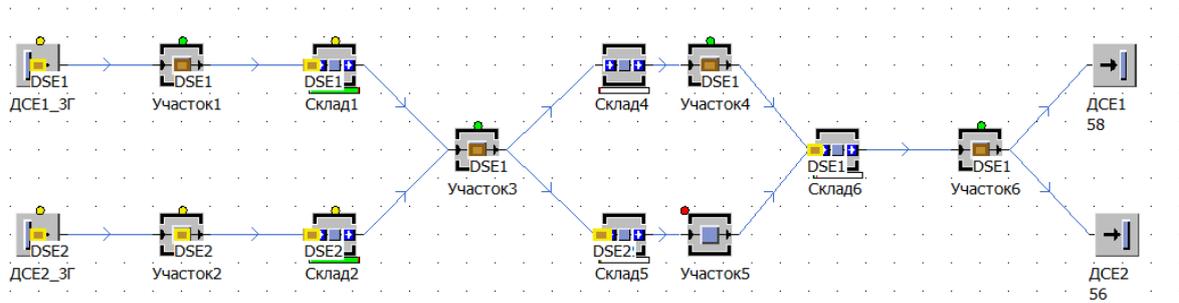


Рисунок 57 – Синхронизированное производство через две недели после начала

Результаты второй недели также соответствуют теоретическому максимум – 114 изделий, против 100 изделий в первом случае (рисунок 58). Кроме того, отчетливо видна разница в уровне незавершенного производства.

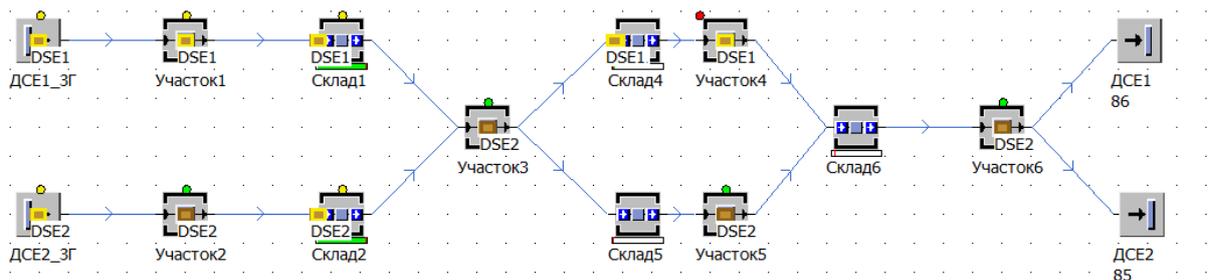


Рисунок 58 – Синхронизированное производство через три недели после начала

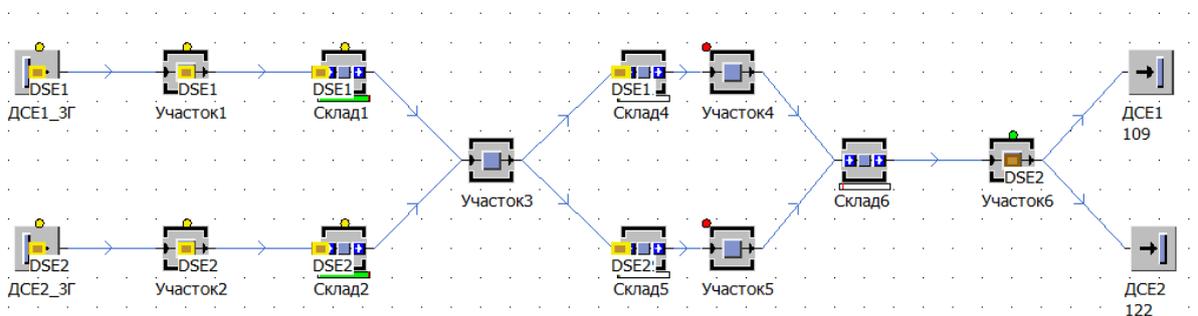


Рисунок 59 – Синхронизированное производство через четыре недели после начала

Результаты производства через 3 и 4 недели приведены на рисунок 58 и 59. Если бы эксперимент завершался бы через четыре недели – выводы можно бы было сделать автоматически: 231 изделие против 203 изделий. Однако, как указано выше, на пятой неделе участки №4 и №5 простаивают, излишнее незавершенное производство отсутствует, поэтому участок №6 вынуждено останавливается ввиду отсутствия полуфабрикатов. Остальные участки также простаивают ввиду поломки оборудования, таким образом все производство простаивает в течении целой недели. Данная ситуация характерна для вытягивающих производств, и это одна из сильных сторон организации такого производства. Как будет показано в конце данного раздела, даже такой длительный простой не смог изменить картины в целом.

Дальнейшие результаты производства представлены на рис. 60 – 63.

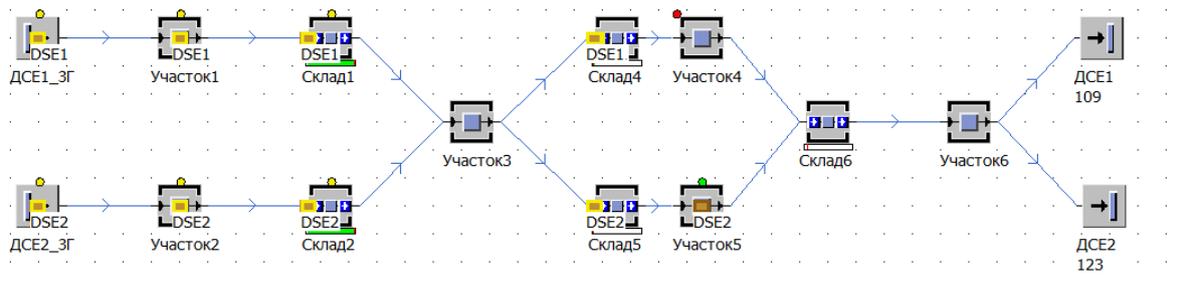


Рисунок 60 – Синхронизированное производство через пять недель после начала

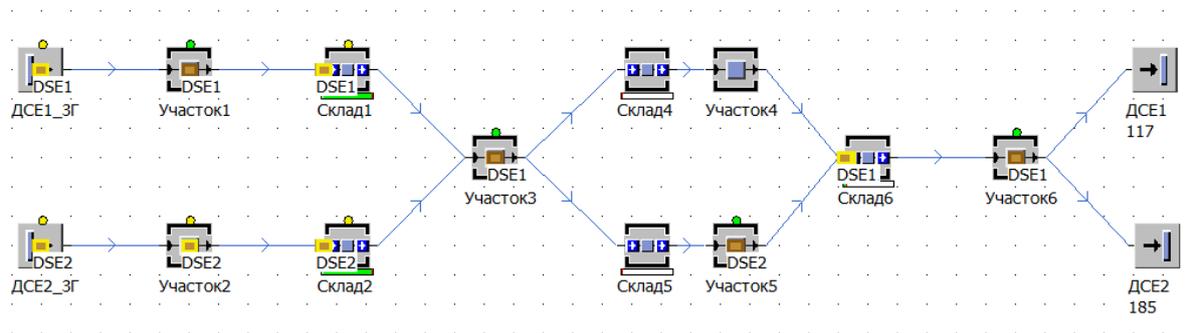


Рисунок 61 – Синхронизированное производство через шесть недель после начала

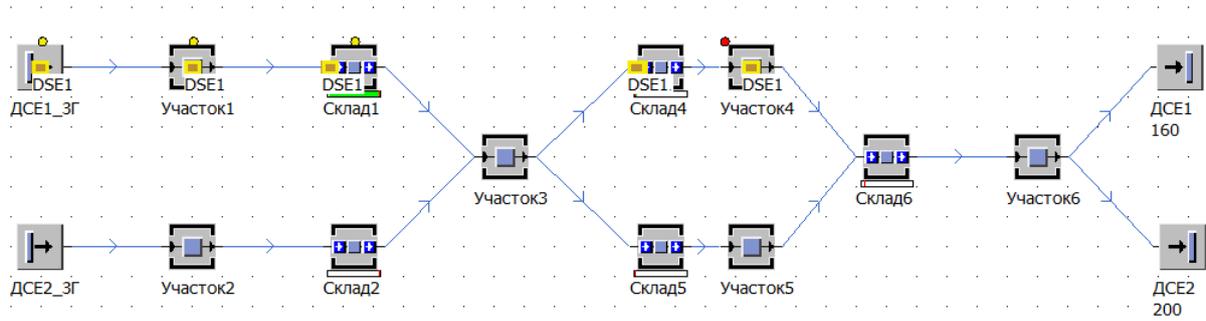


Рисунок 62 – Синхронизированное производство через семь недель после начала

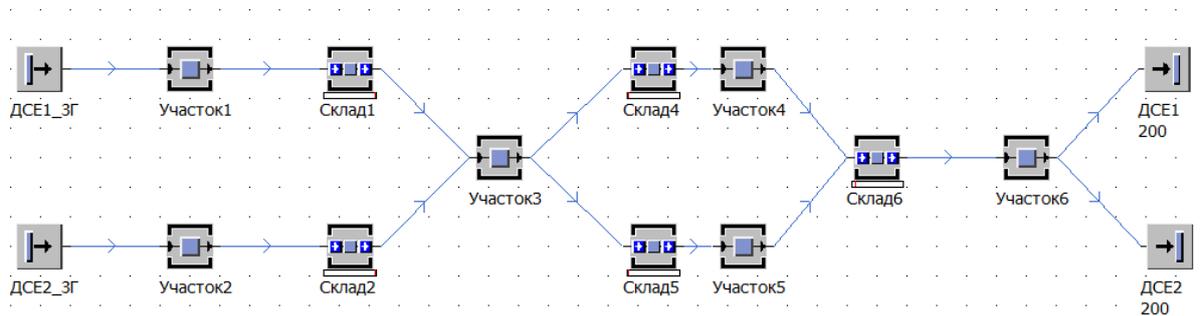


Рисунок 63 – Синхронизированное производство в третий день восьмой недели

Допустим, что оборудование на участках №4 и №5 работает нестабильно, со средней доступностью 50% и средним временем ремонта составляющим 10 рабочих дней. Сведем результаты моделирования в таблице 22.

Таблица 22 Результаты моделирования

		Классическое производство		Синхронизированное производство	
		ДСЕ 1	ДСЕ2	ДСЕ1	ДСЕ2
Время	завершения	40 день	36 день	38 день	31 день
заказа		(8 недель)	(7 недель)	(8 недель)	(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%	

Рассмотренный демонстрационный пример построен таким образом, чтобы наиболее объективно отразить особенности выталкивающего и синхронизированного производства – достигнутый результат лишь отчасти отражает потенциальную полезность от использования предлагаемого подхода. В реальных условиях вынужденные простои производства позволят увидеть резервы и направить их на выпуск востребованной в данный момент продукции или же на развитие самого производства. В то время, как производство невостребованной продукции лишь увеличивает уровень незавершенного производства и объем замороженных средств предприятия, лишая производство прозрачности и управляемости, что характерно для большинства предприятий России.

4.3. Задача оптимального управления производством на оперативном уровне управления с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при закреплении ресурсов. Решение тестовых задач.

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 [191].

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.

На стадии выбора стратегии формирования сменного задания рассчитываются следующие значения:

- Fw – общий фонд рабочего времени исполнителей
- Fm – фонда рабочего времени оборудования
- Fwm – минимальное из значений Fw и Fm
- Ftr – общая трудоемкость выполнения всех операций во всех партиях полуфабрикатов
- $Ftr1$ – общая трудоемкость выполнения только первых операций в партиях полуфабрикатов.

Исходя из рассчитанных значений, определяется стратегия формирования сменных заданий:

1. «Оптимальное распределение» – данная стратегия используется

в случае, если общая трудоемкость всех доступных операций ниже фонда рабочего времени исполнителей и оборудования ($F_{tr} < F_{wm}$). При использовании данной стратегии для решения задачи достаточно отсортировать список операций по срочности выполнения, последовательно найти для каждой операции оптимальную специализацию по исполнителю и оборудованию из доступных ресурсов и назначить операцию.

2. «Распределение по оборудованию» – данная стратегия используется в случае, если общая трудоемкость всех доступных операций ниже фонда рабочего времени исполнителей ($F_{tr} < F_w$), но выше, чем фонд работы оборудования ($F_{tr} > F_m$). При использовании данной стратегии важно оптимально распределить операции по доступному оборудованию, минимизируя риски простоя и срыва выполнения плана. Для решения задачи операции также сортируются по срочности выполнения, последовательно вычисляется оптимальное оборудование для выполнения операции, фиксируется оборудование и вычисляется оптимальный исполнитель на данном оборудовании, после чего операция назначается.

3. «Распределение по исполнителям» – данная стратегия используется в случае, если общая трудоемкость всех доступных операций ниже фонда рабочего времени оборудования ($F_{tr} < F_w$), но выше, чем фонд работы исполнителей ($F_{tr} > F_m$). При использовании данной стратегии важно оптимально распределить операции по исполнителям, минимизируя риски простоя и срыва выполнения плана. Для решения задачи операции также

сортируются по срочности выполнения, последовательно вычисляется оптимальный исполнитель для выполнения операции, фиксируется исполнитель и вычисляется оптимальное оборудование для выбранного исполнителя, после чего операция назначается.

4. «Первые или срочные» – данная стратегия используется в случае, если общая трудоемкость всех доступных операций выше фонда рабочего времени оборудования и исполнителей ($F_{tr} > F_w, F_{tr} > F_m$), но трудоемкость выполнения первых операций ниже фонда рабочего времени оборудования или исполнителей ($F_{tr1} < F_w$ или $F_{tr1} < F_m$). На практике такая стратегия встречается достаточно часто. Для решения задачи необходимо сформировать два перечня операций – первые операции и самые срочные операции с общей трудоемкостью F_{wm} . Далее планируются операции, которые попали в оба перечня. Затем на каждой итерации сравниваются значения обобщенного критерия оптимальности для первых операций из двух списков – назначается та, для которой значение критерия предпочтительнее. Операции, которые недоступны для назначения, пропускаются. Сменное задание формируется до тех пор, пока оборудование или исполнители не будут полностью загружены, а если потребуется, список операций может быть расширен следующими по срочности операциями.
5. «Высокий уровень незавершенного производства» – данная стратегия используется в случае, если общая трудоемкость первых операций выше фонда рабочего времени оборудования или исполнителей ($F_{tr1} > F_{mw}$). На практике это самая частая ситуация, которая говорит о недостаточном качестве управления производством. При использовании данной

стратегии для решения задачи необходимо отсортировать список операций по срочности выполнения и последовательно назначать операции, пока оборудование или исполнители не будут полностью загружены.

Демонстрационный пример для такой задачи кажется избыточным ввиду простоты алгоритма, в главе, посвященной практической реализации системы будут приведены результаты апробации алгоритма в условиях реального машиностроительного предприятия.

4.4. Математическая модель принятия коллективных решений на базе единой информационной системы промышленного предприятия.

Задача принятия коллективных решений характерна тем, что исследуются ограниченное число возможных альтернатив. Выбор оптимального значения описан в главе 3, он предполагает специального индекса ранжирования. Ввиду низкой размерности задачи решение осуществляется полным перебором всех значений.

Демонстрационный пример применения моделей многокритериального выбора

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* (оценивается от 0 до 1). Календарный план производства должен быть скомпонован таким образом, чтобы операции одного вида запускались в производство как можно большими партиями, минимизируя при этом потери на переналадку оборудования.

2. *Равномерность производства* (от 0 до 1). Нагрузка на рабочие центры должна быть распределена таким образом, чтобы загрузка рабочих центров в течение планового периода изменялась постепенно, без резких перепадов.

3. *Минимальность срока изготовления* (от 0 до 1). Цикл производства каждой позиции ГКПП от момента запуска производства до выпуска должен быть минимальным.

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 23).

Таблица 23 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

Отметим, что альтернатива x_1 соответствует тому варианту плана производства, при котором большинство изделий производится точно в срок, установленный ГКПП; альтернатива x_2 обеспечивает «комфортность» производства за счет увеличения объемов партий и уменьшения времени переналадок оборудования; альтернатива x_3 позволяет обеспечить более равномерную загрузку оборудования при производстве запланированной продукции.

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.

В общем случае ранжирование альтернатив по многим показателям является достаточно сложной задачей для экспертов, поэтому желательно предоставлять экспертам дополнительную информацию о важности принятых показателей качества возможной альтернативы, характеризующих текущую политику предприятия на рынке продукции.

На основе вышесказанного 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 24).

Таблица 24 Важности показателей качества альтернатив

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

Первоначально произведем выбор наилучшего коллективного решения по *многокритериальной линейной модели* в предположении, что квалификация экспертов не связана с экономическим смыслом частных показателей качества альтернативы. Тогда предпочтения экспертов в модели задаются формулами 36), а выбор осуществляется по формуле (37).

Оценим линейные свертки альтернатив, исходя из достигнутых значений частных показателей и их важностей (таблица 25).

Таблица 25 Значения показателей качества альтернатив

№ п/п	Наименование альтернативы	Достигнутые значения показателей			$S^i = \sum_{k=1}^r v_k \cdot J_k^i$
		Комфорт- ность	Равномер ность	Срок изготовлен ия	
x1	Точно вовремя	0,62	0,44	0,89	1,38
x2	Максимальные партии	0,76	0,53	0,56	1,15
x3	Ритмичность	0,55	0,87	0,61	1,23

В таблице 26 приведены предпочтения каждого эксперта на множестве альтернатив в виде значений λ_j^i , изменяющихся от 0 до 1, а также многокритериальные оценки альтернатив, рассчитанные для каждого эксперта. Подчеркнем, что в рамках данной модели варианты предпочтений экспертов формируются автоматически без их участия (последний столбец таблицы 26).

Таблица 26 Предпочтения экспертов

№ п/п	Эксперт	Альтернативы						Предпочтения экспертов
		x1		x2		x3		
		λ_j^1	$\lambda_j^1 S^1$	λ_j^2	$\lambda_j^2 S^2$	λ_j^3	$\lambda_j^3 S^3$	
1	«Продажа» 1	0,60	0,82	0,20	0,23	0,20	0,25	$x_1 > x_3 > x_2$
2	«Продажа» 2	0,50	0,68	0,30	0,32	0,20	0,24	$x_1 > x_2 > x_3$
3	«Экономика» 1	0,34	0,48	0,33	0,35	0,33	0,40	$x_1 > x_3 > x_2$
4	«Экономика» 2	0,40	0,55	0,40	0,45	0,20	0,25	$x_1 > x_2 > x_3$
5	«Производство» 1	0,00	0,00	0,50	0,58	0,50	0,63	$x_3 > x_2 > x_1$
6	«Производство» 2	0,30	0,41	0,40	0,46	0,30	0,38	$x_2 > x_1 > x_3$
7	«Оборудование»	0,25	0,34	0,50	0,58	0,25	0,30	$x_2 > x_1 > x_3$
8	«Персонал»	0,25	0,35	0,25	0,30	0,50	0,63	$x_3 > x_1 > x_2$
9	«Финансы» 1	0,50	0,70	0,30	0,33	0,20	0,23	$x_1 > x_2 > x_3$
10	«Финансы» 2	0,60	0,85	0,25	0,30	0,15	0,20	$x_1 > x_2 > x_3$

Из таблицы 26 видно, что предпочтение по 1-му из возможных вариантов выразили эксперты 2, 4, 9 и 10; по 2-му – 1 и 3; по 3-му – 6 и 7; по 5-му – 8; по 6-му – 5.

Значения функций *предпочтительности* альтернатив распределились следующим образом:

$$pr(x_1) = 5,18, pr(x_2) = 3,9, r(x_3) = 3,51.$$

Значит, по данной модели лучшим коллективным решением является альтернатива x_1 .

Отметим, что полученное коллективное решение совпадает с решениями, полученными по первым двум моделям Кондорсе и Борда (см. примеры 3.1, 3.3 и 3.4). Однако преимущество последней модели – упрощение работы экспертов при многокритериальном сравнении альтернатив. Им требуется только дать численные оценки каждой альтернативе, а конечное предпочтение формируется с помощью самой модели.

Как было отмечено выше, к недостаткам предложенной модели можно отнести гипотезу линейности при формировании комплексной оценки качества альтернативы, поэтому рассмотрим применение четвертой модели, основанной на нечеткой постановке.

Результаты попарного сравнения частных показателей качества J_k^i с учетом их важности ν_k приведены в таблице 27.

Таблица 27 Результаты попарного сравнения альтернатив

/П	Пары альтернатив		C_1	C_2	C_3	Результат сравнения
	J^{r1}	J^{r2}				
	x_1	x_2	-0,092	-0,06	0,370	$x_1 > x_2$
	x_2	x_3	0,138	-0,15	-0,081	$x_3 > x_2$
	x_3	x_1	-0,056	0,200	-0,314	$x_1 > x_3$

Жирным шрифтом в таблице 27 отмечены максимальные по модулю элементы сравнения рассматриваемых альтернатив, входящих в специальные индексы ранжирования. В результате парного сравнения (последний столбец таблицы 27) можно сделать вывод о том, что лучшим коллективным решением по данной модели является альтернатива x_1 .

Отметим, что последняя из рассмотренных моделей позволяет провести комплексное оценивание альтернатив, при котором роль экспертов заключается не в оценивании каждой альтернативы, а в установлении коэффициентов важности введенных частных показателей качества. В приведенном примере эти коэффициенты совпали с коэффициентами, установленными ОЛПР в рамках 3-й модели, поэтому результаты коллективного решения по этим моделям совпали. Очевидно, что при изменении экспертной оценки важности частных показателей качества предпочтительная альтернатива может измениться.

Перейдем к описанию алгоритма принятия коллективного решения. Подобный алгоритм выбора лучшего проекта информационной системы рассмотрен в работе [117].

Алгоритм принятия коллективных решений в рамках ситуационного центра предприятия

Рассмотрим 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, функции которого описаны в главе 2. Алгоритм отражает только общую схему принятия решения, поэтому регламент действия субъектов не прописывается.

Алгоритм получения, анализа и выбора лучшего решения имеет следующий вид [40]:

1. Постановка ситуационной задачи, в рамках которой формулируется возникшая проблема и определяются заинтересованные в ее решении стороны, из числа которых формируется ГЛПР и назначается ОЛПР.

2. Участниками ГЛПР под руководством ОЛПР ставится задача оценки и выбора лучшего варианта решения ситуационной задачи. При этом разрабатывается набор частных критериев качества решения задачи и задается шкала их оценивания, а также определяются все имеющиеся ограничения задачи (по ресурсам, времени и т.п.).

3. С помощью специально разработанных математических моделей ИТ-службой в рамках ситуационного центра предприятия производятся необходимые расчеты и формируется исходное множество альтернатив – допустимых недоминирующихся вариантов решения поставленной ситуационной задачи (Парето-решений) с набором полученных значений частных критериев качества для каждой альтернативы.

4. Анализ и проверка полученного множества альтернатив на допустимость *реализации* (путем привлечения дополнительных экспертов из различных подразделений предприятия), а также «отбраковка» неприемлемых альтернатив или их отправка на доработку в ИТ-службу.

5. Сравнение участниками ГЛПР оставшихся альтернатив и выбор наилучшей с помощью различных *моделей принятия коллективных решений*.

6. Если решения получены, то они сообщаются ОЛПР, а если нет, то производится корректировка одного или нескольких предыдущих этапов.

7. ОЛПР рассматривает полученные решения, и если они его не удовлетворяют, то производится корректировка предыдущих этапов (чаще всего корректируются пп. 1, 2 и 4).

8. Подготовка окончательной информации, содержащей выбранные альтернативы с указанием их основных преимуществ и результатов сравнительного анализа.

9. На основе полученной информации ОЛПР осуществляет окончательный выбор лучшего решения ситуационной задачи.

Блок-схема алгоритма принятия коллективных решений в рамках ситуационного центра предприятия представлена на рисунке 64.

Предлагаемый алгоритм может быть усовершенствован путем разработки более точных моделей поиска допустимых Парето-решений ситуационной задачи (п. 3 алгоритма) и/или уточнения моделей принятия коллективных решений (п. 5 алгоритма).



Рисунок 64 – блок-схема алгоритма принятия коллективных решений

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.

Выводы по главе

В главе проведен анализ существующих алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации, оценена возможность применения методов для решения задач календарного планирования, синхронизации производства, оперативного управления и принятия коллективных решений. В результате проведенного анализа было выявлено, что для рассматриваемых задач дискретной оптимизации больших размерностей применение существующих алгоритмов возможно лишь в частных случаях. Задача

принятия коллективных решений решается полным перебором возможных решений, а для решения остальных задач были разработаны специальные эвристические алгоритмы.

Решение тестовых задач наглядно продемонстрировало, что все применяемые алгоритмы способны находить наилучшие решения, по крайней мере на тестовом наборе данных. Для принятия решения об адекватности работы алгоритмов необходима практическая реализация интеллектуальных элементов и система поддержки принятия решений, и апробация алгоритмов в условиях реального производства. Следующая глава будет посвящена практической реализации интеллектуальной системы управления предприятием.

Глава 5. Практическая реализация автоматизированной интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства

В данной главе рассмотрена практическая реализация интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства. В рамках данной работы предложен 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). Существующие на рынке ERP-решения являются хорошо структурированными, с хорошо проработанными логическими моделями данных. 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.

5.1. Технологические платформы интеллектуальных систем управления предприятием

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 [202, 203, 204, 205], Галактика и т.д. Все производители современных ERP-систем [47] вкладывают средства в постоянное развитие своих решений. 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. [206] Используя данные механизмы, можно как изменить механизмы работы системы, так и расширить функционал системы с минимальными трудозатратами. Такой подход ограничен в степени влияния на работу системы, в частности, он не может изменить

существующую модель данных или же вмешаться в работу основных алгоритмов системы, но подход тем не менее обладает серьезным потенциалом.

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). Разработчиками интеллектуальных элементов могут быть как специалисты самого предприятия, так и сторонние разработчики, специально нанятые для этих целей.

Также следует отметить, что большинство конкурирующих на рынке систем имеют сходную модель данных, соответствующую стандартам MRP II [207], MES [208] и т.д. Таким образом, программная реализация математической модели может быть использована для расширения функционала различных систем путем дополнительной разработки модулей интеграции. Разрабатываемые математические модели интеллектуальных элементов должны максимально соответствовать стандартам в части модели данных, особенно это касается входных данных для задач. Использование дополнительной информации, не предусмотренной в стандартах, может быть выполнено только при определении способа получения этой информации (автоматический сбор данных, ручной ввод и т.д.).

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, представленными в главе 1.6 [209, 210, 211, 212, 213]:

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

5.2. Описание подсистем и базовой функциональности

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), функциональность и возможности модификации которой делают ее подходящей платформой для реализации интеллектуальной системы управления предприятием [214]. Конфигурация является флагманским решением, разработанным фирмой «1С». Система нашла свое реальное применение на множестве действующих предприятий. Пользователями стали миллионы людей по всему миру [122]. Конфигурация предлагает широкий спектр инструментов, которые позволяют повысить эффективность работы организации, увеличить прозрачность и достоверность информации, обеспечить контроль выполнения процессов и ускорить принятие решений.

1С:ERP является одной из практических реализаций концепции управления ERP [122]. В системе представлен необходимый набор управленческих инструментов для построения эффективного управления современным производственным предприятием:

- комплексная реализация функций системы управления предприятия в процессе его деятельности;
- формирование единого информационного пространства для управления основными бизнес-процессами предприятия;
- обеспечение решения задач различных уровней управления, коммуникации и обмена информацией между ними;
- унификация алгоритмов обработки и структурирование информации;
- расширение функциональных возможностей за счет отраслевых и специализированных решений;
- поддержка актуальных инновационных технологий;
- встроенная интеграция с другими системами 1С, разработанными на базе программно-технологической платформы «1С:Предприятие 8»;
- соответствие заложенных в систему решений требованиям законодательства РФ.

1С:ERP позволяет реализовать все основные функции управления предприятием, такие как планирование и прогнозирование, учет и контроль, анализ, организация и координация, коммуникация, мотивация и обучение [122, 215]. Предусмотрена возможность формирования и согласования всевозможных плановых показателей по различным функциональным бизнес-процессам, например, планов закупок, планов продаж, планов производства и т.п. [203]. В системе предусмотрена возможность формализации бизнес-процессов как с точки зрения определенной последовательности действий и необходимых процедур, так и со стороны правил их выполнения, конкретных ограничений и лимитов, алгоритмов и расчетов. Предусмотрена возможность настройки необходимых маршрутов

согласования и подготовки документов, отражения фактов выполнения определенных этапов бизнес-процессов. Кроме того, в системе заложены механизмы контроля установленных ограничений и лимитов, направленные на выявление отклонений от утвержденных на предприятии регламентов с целью предотвращения нарушений и злоупотреблений ответственными лицами [203].

Реализованные в системе функции *учета*, основаны на обработке множества операций в режиме реального времени. Ввод данных выполняется с учетом аналитики, отражающей специфику функционального процесса. Данные непрерывно регистрируются в информационной базе в хронологическом порядке при обеспечении необходимого доступа к информации всем ее потребителям и многократного ее использования. Функции *контроля* позволяют выявить соответствие полученного результата установленным на предприятии правилам, соблюдению ограничений и требований, а также запланированным или нормативным значениям. Функции *коммуникаций* реализованы в виде взаимного обмена информацией внутри бизнес-модели предприятия.

1С:ERP позволяет обеспечить менеджмент предприятия оперативной информацией, необходимой для *анализа* и принятия решений в процессе осуществления функций управления [216, 217, 193, 194], при помощи гибко настраиваемой отчетности. Структурированная и непрерывно пополняемая информация, хранящаяся по результатам выполнения бизнес-процессов, может выступать в качестве исторической базы знаний предприятия. Другими словами, система может служить ориентиром и обеспечивать передачу знаний новым сотрудникам, реализуя тем самым функции *обучения*.

В 1С:ERP обеспечивается функциональность различных подсистем управления в едином информационном пространстве, бизнес-процессы

реализованы в целостной информационной базе. Данный подход является одним из основных принципов технологии ERP, предусматривающим единую транзакционную систему для большинства операций и бизнес-процессов в организации. Это позволяет решить целый ряд вопросов, связанных с интеграцией и оперативным информационным обменом между смежными бизнес-процессами, входящими в различные функциональные блоки (подсистемы). Обеспечивается однократный ввод данных в систему в рамках одного процесса и многократное их использование в рамках других бизнес-процессов.

При этом в системе предусмотрена возможность отражения, анализа и контроля показателей [218]:

- плановых показателей по различным горизонтам и сценариям планирования (натуральных и стоимостных);
- фактических показателей, отражающих результаты деятельности предприятия (натуральных и стоимостных);
- норм и нормативов;
- расчетных показателей, вычисляемых по определенным правилам на базе отраженных в системе норм и нормативов, фактических, плановых значений показателей и т.д.

На оперативном уровне управления 1С:ERP дает возможность осуществлять контроль за выполнением производственных и операционных заданий на основании отраженной в системе информации о ходе их выполнения, например, отслеживание хода выполнения производственных этапов, заказов переработчикам, заказов на перемещение, заказов на сборку, поручений экспедиторам и т.д.

На тактическом уровне представлены инструменты для мониторинга показателей по отдельным бизнес-процессам, бюджетам и сферам деятельности предприятия, за которые отвечает возглавляемое менеджером подразделение.

Стратегический уровень управления реализуется в виде мониторинга различных показателей, характеризующих как текущее состояние предприятия, так и будущие перспективы его деятельности на различных горизонтах планирования и по различным сценарным условиям.



Рисунок 65 – Основные функциональные возможности 1С:ERP

Ниже будут рассмотрены основные подсистемы 1С:ERP (продажи, производство, закупки), особенности их реализации и потенциальные места встраивания интеллектуальных элементов.

5.1.2 Управление продажами

В составе 1С:ERP представлен функционал, реализующий основные задачи по управлению сбытовой деятельностью предприятия, обеспечивая:

- Планирование продаж по конкретной номенклатуре или по товарным категориям, детализацию планов по различным аналитикам, например, по подразделениям, складам, розничным магазинам, соглашениям с покупателями.
- Гибкое ценообразование, включая ведение нескольких видов цен в различных валютах, управление наценками и скидками.

- Ведение общих типовых или индивидуальных условий продажи продукции: ценовых (наценки и скидки), логистических (склад отгрузки, сроки поставки), финансовых (график и форма оплаты), а также прочих условий, касающихся валюты расчетов, начисления НДС и др.
- Управление оптовыми продажами со склада и под конкретный заказ.
- Отражение последовательности шагов в процессе ведения продаж по «полному циклу», начиная с формирования коммерческих предложений.
- Регистрацию заключенных с покупателями (заказчиками) договоров.
- Различные схемы обеспечения выполнения заказов, включая резервирование продукции (товаров) на складах.
- Оформление операций отгрузки продукции и товаров со склада, учет тары.
- Мониторинг исполнения заказов и выполнения взаиморасчетов по ним.

При построении интеллектуальной системы управления продажами могут быть интересны следующие интеллектуальные элементы:

- Автоматический анализ выполнения условий договоров с покупателями, анализ состояния взаиморасчетов запрет отгрузки, ограничение работы по ним в зависимости от установленных лимитов и сроков задолженности по оплате.
- Развитие (замена) мобильного приложения «1С:Мобильная торговля», интегрированного с 1С:ERP Управление предприятием, для удаленной работы торговых представителей, в том числе с интеллектуальными функциями: чат-бот ассистент продаж, онлайн-калькулятор скидок, быстрая регистрация сделки.
- Автоматический контролер воронки продаж, анализирующий эффективность продаж, выявляющий тенденции изменения продаж, автоматически формирующий задания менеджерам по продажам на выполнение корректирующих воздействий.

- Автоматический инструмент по работе с просроченной задолженностью (уведомления сторон, подготовка и отправка претензий).
- Развитие средств предоставления доступа к системе покупателям (заказчикам) для самостоятельной регистрации заказов и получения оперативной информации об их исполнении, с развитой степенью автономности (предоставление скидок, специальных предложений).

5.1.3 Управление производством

В 1С:ERP встроен модуль управления спецификациями. По каждому изделию в системе формируется информация о его структуре и составляющих его элементах, о материальных и трудовых ресурсах (ресурсная спецификация), о последовательности технологических этапов и операций (маршрутная карта, технологическая карта), необходимых для его производства.

Планирование производства реализовано в виде трех механизмов:

- 1) MRP-планирование, которое на основании плана выпуска готовых изделий планирует потребности в полуфабрикатах и покупных материалах (комплектующих). При этом система также рассчитывает потребность в трудовых ресурсах и мощностях (CRP). При этом встроенного модуля балансировки мощностей в системе нет.
- 2) Расчет графика производства открытых заказов. Запуск производства продукции инициируется созданием заказа на производство. При вызове функции расчета графика производства, система формирует очередь заказов на производство с учетом приоритетов и необходимых сроков изготовления продукции. Каждый из заказов в очереди планируется с учетом доступности материалов и производственных мощностей. Этот механизм позволяет оценить исполнимость заказов на производство к дате потребности, выполнить анализ критического пути, сформировать скоординированные между собой производственные планы отдельным подразделениям, выполнить оптимизацию использования материальных

ресурсов и мощностей. Данный механизм имеет ряд ограничений, главным из которых является тот факт, что в расчете участвуют только запущенные в производство заказы.

3) Формирование расписания производственных операций. График производства с установленными сроками исполнения производственных этапов является основанием для организации работ в подразделениях. В системе предусмотрено три механизма оперативного планирования:

- a) механизм формирования расписания этапов производства по узким местам («барабан – буфер – верёвка») диспетчером цеха является наиболее простым в реализации механизмом;
- b) механизм формирования сменных заданий мастерами цехов позволяет мастеру выбрать все доступные к назначению операции открытых заказов и назначить единицу оборудования и исполнителя (рабочего, бригаду);
- c) механизм автоматического формирования расписания выполнения технологических операций, распределяющий операции по рабочим центрам, указанным в технологических картах с учетом ограничений трудовых ресурсов, сложная переналадка и инструмент не учитываются.

В дополнение к развитым механизмам планирования производства 1С:ERP обладает мощнейшими механизмами управленческого учета, позволяющего учитывать факт совершения операций, вести учет понесенных затрат, выработки сотрудников, выпуска (готовых изделий, работ и полуфабрикатов), брак и возвратные отходы.

При этом учет организован таким образом, что при определенной настройке выполняются следующие важнейшие условия:

- 1) Материальные затраты, выработка сотрудников, выполнение технологических операций, брак и выпуск относятся непосредственно на партию изделий (деталей, полуфабрикатов), что позволяет детально

анализировать структуру себестоимости, план-факт выполнения производственных нормативов и т.д.

- 2) Любая затрата материалов и комплектующих расшифровывается до первичных документов поступления (приобретения), что позволяет точно проследить движение материалов в производстве.
- 3) Для каждого выпускаемого изделия автоматически строится дерево себестоимости, показывающее все партии полуфабрикатов (сборки, детали, растворы, сплавы), вошедшие в изделие в виде многоуровневого дерева вплоть до материалов.

Такой способ организации учета позволяет успешно реализовать современные принципы и модели управления производственными системами, детально анализируя ход производственного процесса, загрузку производства, выявлять узкие места, анализировать критический путь производства и т.д.

Функционал блока управления производством взаимосвязан с другими функциональными блоками 1С:ERP. Например, для организации снабжения производства требуемыми материальными ресурсами в систему управления закупками передаются потребности в закупаемых компонентах. Для организации сбыта произведенной продукции производство синхронизировано с блоком управления сбытовой деятельностью, которое, в свою очередь, может также служить источником для формирования производственных заказов.

Функционал управления производством уже сейчас является наиболее сложным и наиболее проработанным. Тем не менее, потребности реальных предприятий растут с каждым днем. Отметим здесь только те направления построения интеллектуальной системы управления, которые, по мнению автора, наиболее востребованы:

- Разработка полноценного модуля APS (см. главу 1.6) с интеллектуальным резервированием в режиме онлайн запасов,

мощностей и трудовых ресурсов для выполнения всей производственной программы.

- Интеллектуальный диспетчер производства, реагирующий на все виды отклонений в производстве, уведомляющий заинтересованных лиц, принимающий решения в области доверенной ему компетенции.
- Развитие мобильного клиента для 1С:ERP с добавлением функций дополненной реальности, распознавания фото, и т.д., позволяющих мгновенно получать полную информацию о ходе выполнения заказов на производство, формировать сменные задания и отмечать выполнение операций.
- Автоматическая регистрация учетных операций на основании данных SCADA. На многих предприятиях логистические и производственные операции выполняются полностью автоматически, а данные о выполнении автоматически поступают в SCADA, откуда могут передаваться в ERP в виде очереди сообщений. Используя эти данные, можно сделать полностью автоматической регистрацию выполнения операций в сменных заданиях, перемещений материалов, списания материалов в производство и многие другие. В качестве примера можно привести компонент учета зерновых, который автоматически регистрирует перемещение сырья на производство из нескольких зернохранилищ (силосов). Для расчета используется информация о степени открытия люков хранилищ, информация о настроенных маршрутах движения, информация об уровне заполнения суточного силоса и информация с электронных весов, установленных на входе в производство. Такой компонент позволяет увеличить точность учета зерновых в несколько раз.
- Мессенджер-бот «мастер участка». Такой интеллектуальный элемент разрабатывается как альтернатива мобильному приложению и позволяет управлять производством, отдавая речевые и текстовые команды чат-

боту через обычный мессенджер (Telegram, Viber, WhatsApp и т.д.). При этом, распознавание речи и так уже есть в мобильном устройстве поэтому чат-боту достаточно будет правильно разобрать текст. Например, «добавить Иванову в сменное задание операцию 210 на станке 3473», далее система найдет рабочего участка с фамилией Иванов, просмотрит перечень доступных операций, найдет из них ту, которая содержит номер 210 и добавит ее на станок с инвентарным номером 3473.

Все описанные примеры интеллектуальных элементов уже реализованы на практике (в том числе при участии автора) и показали свою эффективность. При этом потенциал для развития этих элементов остается крайне великим.

5.1.4 Управление закупками

Функциональный блок управления закупочной деятельностью в 1С:ERP позволяет решать задачи:

- выбора наиболее оптимальных поставщиков;
- обеспечения стабильных поставок ресурсов, требуемых для непрерывной деятельности предприятия;
- оптимизации затрат, связанных с осуществлением закупок.

В системе реализованы следующие функции:

- формирование и обработка потребности в ресурсах;
- регистрация и учет основной информации по поставщикам;
- регистрация договоров, индивидуальных соглашений об условиях закупок;
- ведение цен в разрезе поставляемой номенклатуры;
- ведение истории прошлых поставок, в том числе, для целей ранжирования поставщиков по их надежности;
- планирование закупок, в том числе, с учетом информации, содержащейся в планах продаж и производства, а также на основании заказов

покупателей и применяемой на предприятии политики поддержания запасов;

- оформление в системе заказов поставщикам;
- мониторинг исполнения закупок, контроль получения материально-технических ресурсов, работ и услуг, а также осуществления взаиморасчетов;
- регистрация выявленных при приемке имущества расхождений, корректировка поступлений, оформление возвратов поставщикам;
- управление доставкой, в том числе, создание поручений экспедитору;
- формирование аналитической отчетности по содержанию и исполнению закупок.

Задачи оптимизации уровня складских запасов, повышения управляемости движения ресурсов, снижения затрат предприятия на хранение, повышения эффективности работы складов в 1С:ERP решаются в функциональном блоке управления запасами и складской логистики.

В системе обеспечивается автоматизация следующих процессов в деятельности предприятия:

- поддержание необходимого уровня запасов с использованием различных методов;
- организация работы складского хозяйства на предприятии в зависимости от выбранного способа хранения имущества;
- планирование и осуществление операций по движению запасов предприятия;
- регистрация поступления имущества, включая операции с неотфактурованными поставками и товарами в пути;
- поставки импортных товаров, а также товаров стран ЕАЭС;
- оформление таможенной очистки грузов;
- регистрация внутреннего перемещения запасов;

- учет операций по имуществу, полученному или переданному на ответственное хранение, с оформлением соответствующих первичных документов;
- учет операций по товарам, принятым на комиссию;
- проведение инвентаризации имущества и оформление ее результатов.

При построении интеллектуальной системы управления закупками и оптимизации запасов могут быть интересны следующие интеллектуальные элементы:

- интеллектуальная работа с запасами, основанная на постоянном анализе статистики закупки и потребления материалов, формировании рекомендаций и ограничений по закупкам;
- автоматический анализ выполнения условий договоров с поставщиками, анализ состояния взаиморасчетов, запрет авансов, ограничение работы по ним в зависимости от установленных лимитов и нарушения сроков поставки;
- автоматический инструмент по работе с просроченными авансами (уведомления сторон, подготовка и отправка претензий);
- развитие средств работы с торговыми площадками, автоматизация выбора наилучших предложений и интеллектуальный поиск аналогов.

1С:ERP является современной ERP-системой с развитым функционалом и большим потенциалом для развития. Как будет показано далее, система обладает мощнейшим набором инструментов для развития функционала и встраивания сторонних подсистем. При этом исходный код конфигурации открыт и доступен для внесения изменений. Все это делает 1С:ERP отличным вариантом для построения интеллектуальной системы управления производственного предприятия.

5.3. Дополнительные программные решения для покрытия функциональных разрывов

Несмотря на то, что ERP-решения являются предельно-сложными программными продуктами с тысячами функций и тысячами различных объектов метаданных – ни одна система, существующая на рынке не способна покрыть 100% потребностей предприятий в автоматизации бизнес-процессов [219]. Средний процент покрытия потребностей в автоматизации типовыми ERP-решениями составляет 60%. Т.е. до 40% всех потребностей в автоматизации остаются непокрытыми (функциональные разрывы). Автору не известны исследования, которые могут подтвердить данную оценку достоверной статистикой, но практический опыт реализации различных проектов комплексной автоматизации позволяет с большой долей уверенности говорить, что соотношение в среднем таково.

Функциональные разрывы, выявленные в ходе проектов комплексной автоматизации, могут быть закрыты заказной разработкой, т.е. доработкой существующих программных решений по требованиям заказчика. Однако данный подход имеет два критически-важных недостатка:

1. Высокая стоимость заказной разработки – в России стоимость заказной разработки уже сравнялась со стоимостью аналогичных работ в западных странах. Заказная разработка для покрытия всех требований Заказчика может стоить 100 млн. рублей и более. Далеко не каждое предприятие может позволить себе столь серьезные инвестиции в автоматизацию, при условии того, что проекты комплексной автоматизации сами по себе крайне дороги.
2. Высокая стоимость владения решением. Второй фактор, для крупных компаний становится даже важнее, чем первый. При постоянном развитии бизнеса и наличии различных автоматизированных систем проблемы сопровождения часто выходят на первый план: невозможность оперативного обновления основной конфигурации, несовместимость доработок, низкое качество и производительность программного кода – все это часто

приводит руководство компании к отказу от заказных разработок и инвестициям в повторное внедрение систем управления.

Для того, что минимизировать объем заказной разработки на проектах комплексной автоматизации существуют дополнительные программные решения, способные закрыть функциональные разрывы и минимизировать уровень кастомизации стандартного решения.

Компания «1С» вместе с флагманским решением 1С ERP поставляет на рынок и другие конфигурации. Их можно разделить на два типа:

1. Типовые конфигурации, реализующие функциональность, отсутствующую в 1С:ERP, наиболее характерными являются:

- a. 1С:Документооборот;
- b. 1С:Управление холдингом;
- c. 1С:ERP.Управление холдингом (содержит функциональность 1С:ERP и дополнительную функциональность 1С:Управление холдингом);
- d. 1С:Бухгалтерия – используется при необходимости разделения бухгалтерского и управленческого учета;
- e. 1С:Зарплата и управление персоналом – используется при необходимости выделения функционала управления персоналом в отдельную базу;

2. Отраслевые решения и специализированные решения, способные интегрироваться или встраиваться в типовые конфигурации и решать задачи автоматизации, не решенные в типовых конфигурациях. Наиболее характерными отраслевыми решениями для машиностроения являются:

- a. 1С:ТОИР Управление ремонтами и обслуживанием оборудования 2;
- b. 1С:MES Оперативное управление производством;
- c. 1С:PDM Управление инженерными данными;

- d. 1С:RCM Управление надежностью;
- e. 1С:MDM Управление нормативно-справочной информацией;
- f. 1С:CRM;
- g. 1С:PM Управление проектами. Модуль для 1С:ERP.

Использование дополнительных решений позволяет сократить количество функциональных разрывов до 10% против 40% при использовании типового решения 1С:ERP. Однако, использование дополнительных решений создает необходимость решения вопросов встраивания решений и интеграции. Дополнительной проблемой станет низкое качество программного кода отраслевых решений, который также влияет на работоспособность системы в целом. Решение данных вопросов требует также большого количества ресурсов, но при успешной реализации позволяет существенно снизить стоимость владения системой в целом и создать возможность быстрого обновления типовых решений.

5.4. Архитектура информационной системы предприятия

До начала перехода к интеллектуальной системе управления предприятием зрелость автоматизации основных бизнес-процессов предприятия должна быть достаточно высокой, подробное описание стадий развития системы управления представлено в главе 2.2.1. Как было указано выше, базовый функционал ERP, хоть и является ядром системы управления – не покрывает всех задач автоматизации, существующих на предприятии. Таким образом, актуальной является задача выбора набора решений для покрытия потребностей в автоматизации бизнес-процессов предприятия и взаимной интеграции решений, для построения единой информационной системы предприятия, лишенной информационных разрывов и коллизий представления информации.

Архитектура информационной системы определяет набор программных средств и интеграционных связей между ними [220]. От качества

проработки архитектуры решения сильно зависит возможность системы к масштабированию и развития функциональности [221].

Достаточно характерным для большинства предприятий является ситуация «лоскутной автоматизации», когда процесс автоматизации шел стихийно, по отдельным бизнес-процессам, без учета сложных взаимосвязей между процессами, путем создания самодостаточных инструментов автоматизации, без связей и интеграций. Многолетняя практика реализации проектов комплексной автоматизации показала, что такие системы обречены на проекты повторного внедрения и замены элементов. Уровень автоматизации бизнес-процессов компании по отдельности может быть достаточно велик, но в целом система управления остается разрозненной и несопоставимой [222]. В таких условиях даже решение простых задач анализа причин срыва заказа клиента становится практически нерешаемой ввиду несопоставимости нормативно-справочной информации и отсутствии сквозных аналитик.

На сегодняшний день в проектах комплексной автоматизации рекомендуется использовать децентрализованный вариант архитектуры, который позволяет автоматизировать в Системе целевые бизнес-процессы и обеспечить баланс между требованиями бизнеса к обеспечению автоматизации сквозной цепочки бизнес-процессов при работе в едином информационном пространстве и техническими требованиями по оперативности обновлений ПО и высокой скорости обработки информации. основополагающими принципами архитектуры Системы, являются [222, 223, 224]:

1. Принцип единой точки ввода и контроля информации: одна и та же информация не должна вводиться в разных информационных базах Системы, а должна реплицироваться за счет применения штатных технологий и механизмов;

2. Принцип унификации интерфейса для работы пользователей в «едином окне»: пользователь не должен входить в разные приложения при работе в Системе с данными по сквозной цепочке бизнес-процессов.
3. Архитектура построена на совокупности централизованных и распределенных информационных баз (логически целостных систем, включающих в себя: конфигурацию и хранилище предметной области (базу данных)).

На уровне инфраструктуры как правило используется архитектура приложений, представленная на рисунке 66.

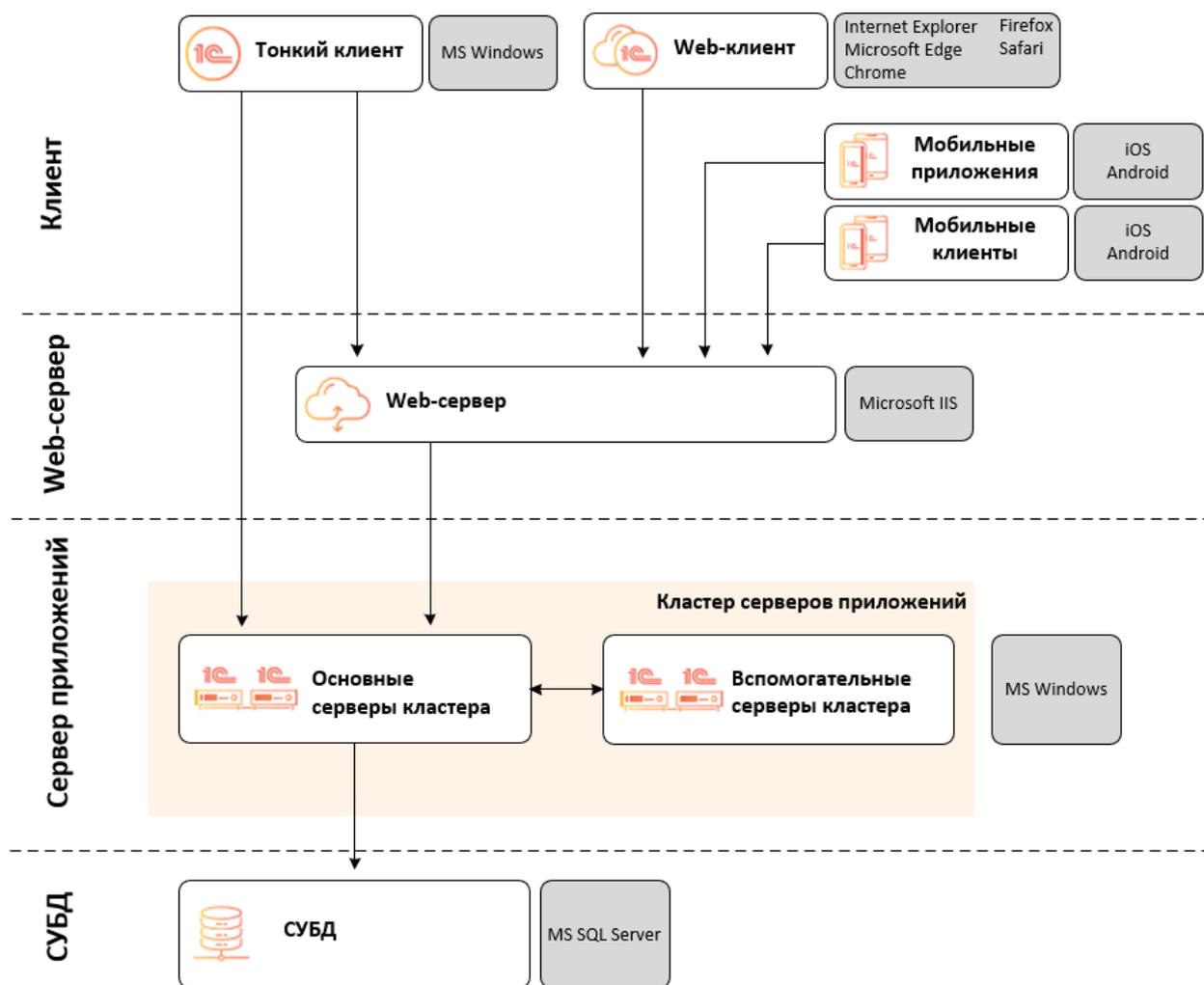


Рисунок 66 – Архитектура информационной системы инфраструктурного уровня

Архитектура информационной системы уровня прикладных решений может быть очень разнообразной. Не существует единственного

правильного подхода к построению архитектуры информационной системы, но существуют типовые шаблоны, которые в совокупности позволяют за ограниченное количество итераций определить наиболее приемлемую архитектуру решения [225].

Рассмотрим типовой пример архитектуры информационной системы машиностроительного предприятия, являющегося частью промышленного холдинга или госкорпорации (рисунок 67).



Рисунок 67 – Архитектура решений машиностроительного предприятия

На данном рисунке не представлены сами прикладные решения, они как правило определяются на следующей итерации проектирования решения.

Подбор программных решений осуществляется на основе выбора платформы решения и сложности интеграций. На рисунке 68 представлен пример покрытия бизнес-процессов компании типовыми программными решениями, присутствующими на рынке России.

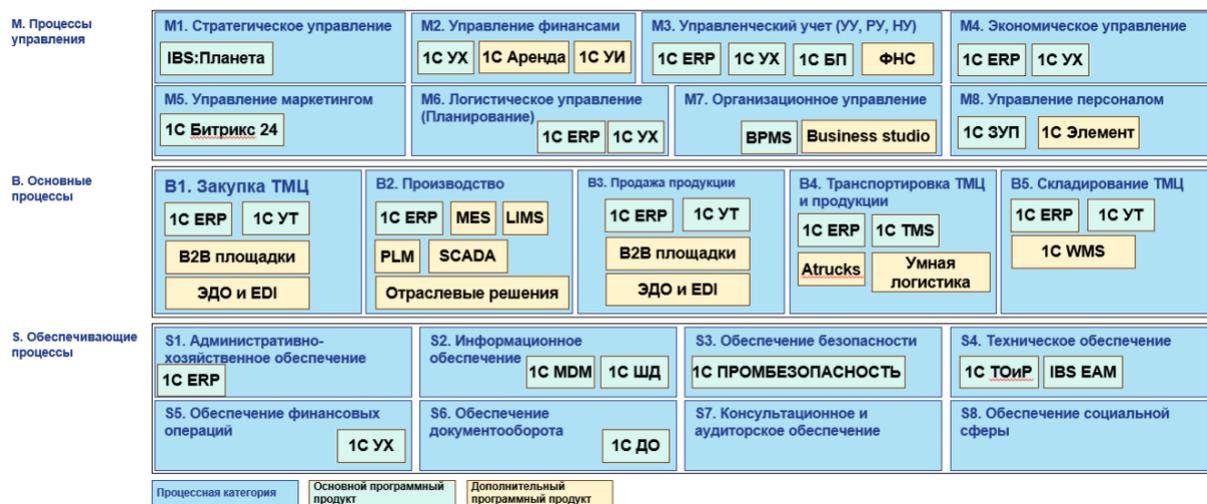


Рисунок 68 – Типовая архитектура программных решений машиностроительного предприятия

Однако такое описание архитектуры решения также не является достаточным для описания архитектуры информационной системы предприятия. Архитектура должна содержать схему интеграционных потоков и структуру переходов функциональности прикладных решений. На рисунке 69 представлен пример архитектуры гетерогенного решения, сформированного на базе российских и зарубежных программных решений.

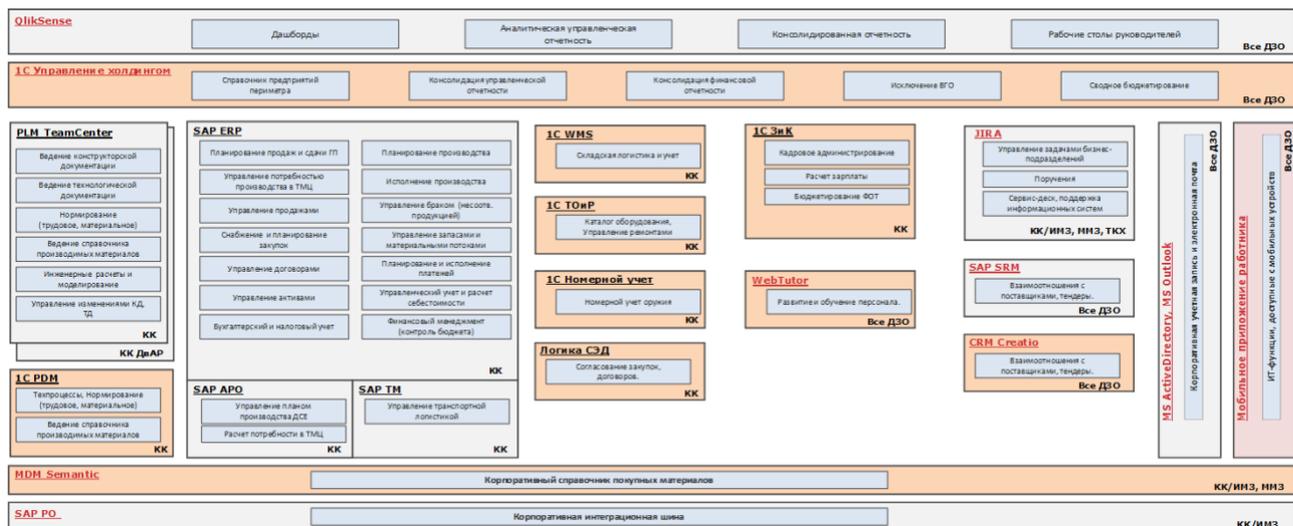


Рисунок 69 – Пример гетерогенного решения

В данном решении также не отражены интеграционные потоки, но уже определены компоненты системы и бизнес-процессы, которые автоматизированы в решении.

Наиболее простыми интеграционными решениями могут стать решения, построенные на базе интеграций «точка-точка». Это позволяет рассматривать интеграционные потоки в отрыве от остальных компонентов системы. Пример такой архитектуры представлен на рисунке 70.

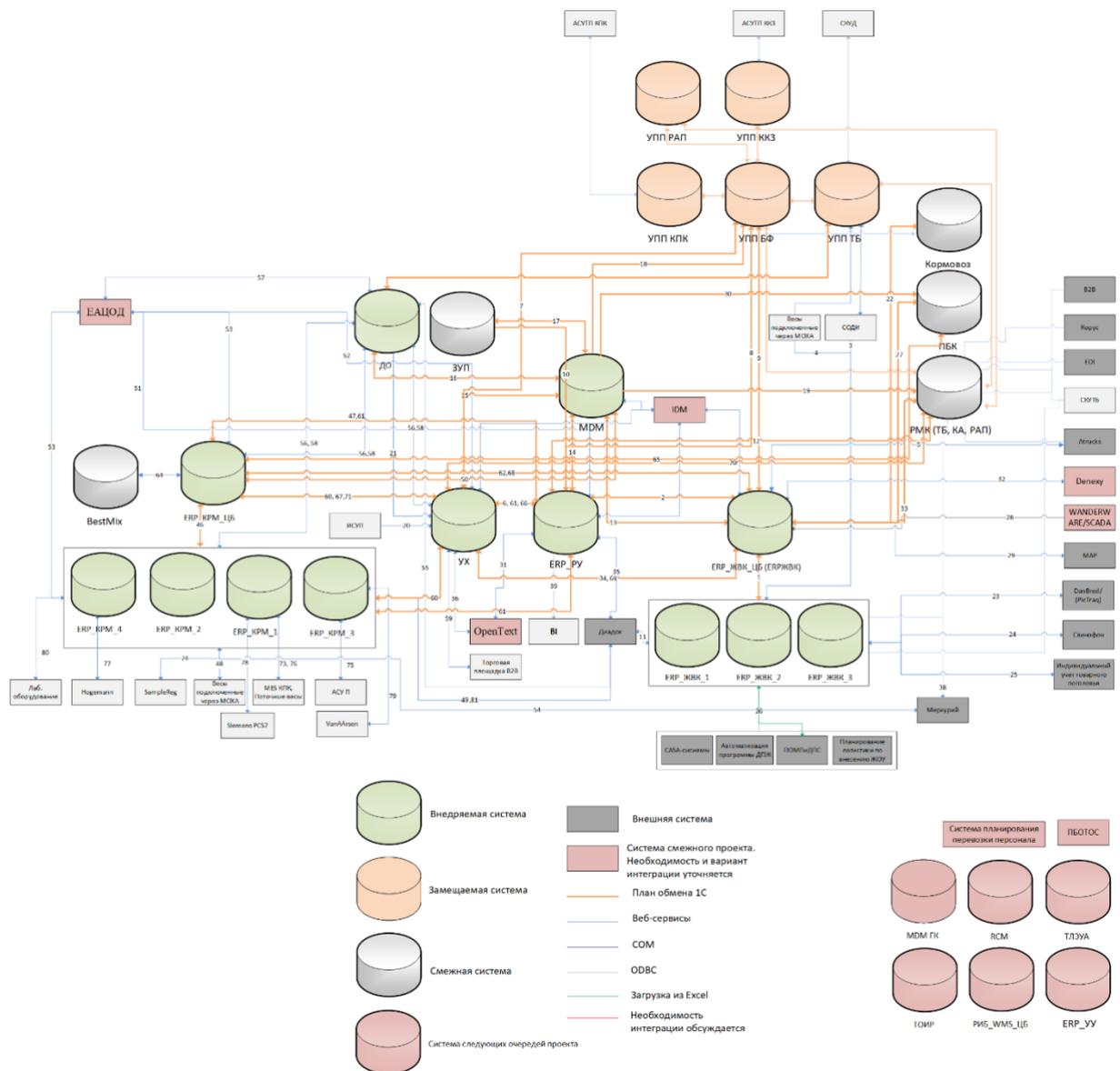


Рисунок 70 – Пример схемы интеграционных потоков предприятия
 Важным свойством представления архитектуры информационной системы является наглядность. Таким образом оптимальным способом

является представлением архитектуры системы в наиболее понятном и читаемом виде. На рисунке 71 представлена та же самая архитектура решения, сформированная в интуитивно-понятной форме.

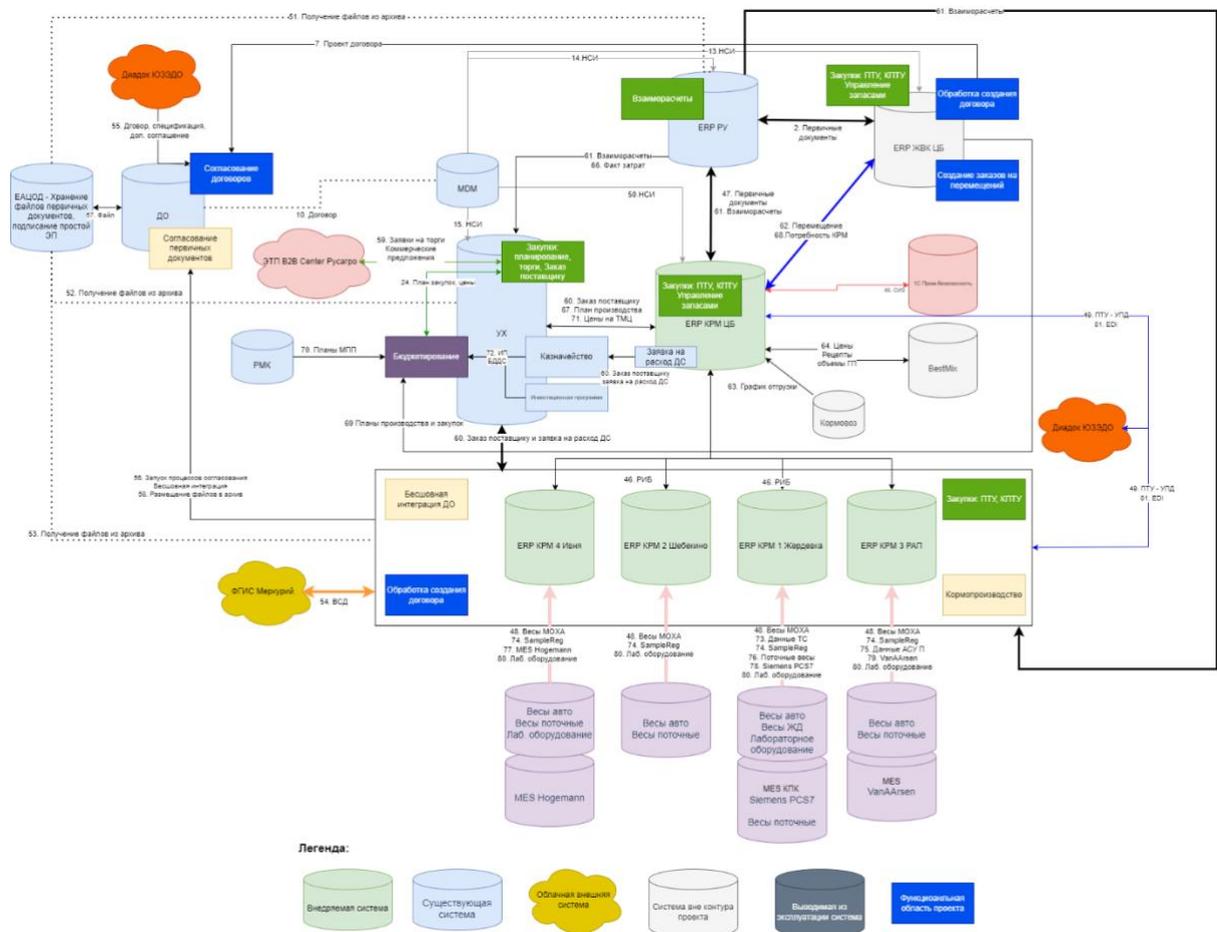


Рисунок 71 – Детальная схема архитектуры прикладных решений.

Практика построения сложных корпоративных информационных систем показала, что при увеличении числа интеграционных потоков типа «точка-точка» надежность работы системы в целом постоянно деградирует. Повышаются риски отказа отдельных интеграционных потоков и «эффект домино» в системах потребителей информации. Таким образом потенциал использования и развития таких систем сильно ограничен.

Для построения комплексных решений важно выбрать правильную концепцию интеграции прикладных решений, позволяющую обеспечить сквозные информационные потоки между решениями. Для целей упорядочивания интеграционных потоков и повышения

отказоустойчивости системы в целом создан отдельный класс решений – интеграционные шины.

Интеграционные шины (enterprise service bus или же сервисные шины предприятия) решают следующие задачи интеграции [226, 227, 228]:

1. Получение пакета данных для передачи по произвольным интерфейсам:
 - a. Файлы
 - b. http-сервис
 - c. web-сервис
 - d. get-запросы и т.д.
2. Предоставление отчета о получении данных.
3. Хранение полученной информации до момента получения подтверждения от всех систем потребителей, что данные приняты.
4. Определение перечня систем потребителей для каждого полученного элемента данных.
5. Сохранение исходного порядка сообщений.
6. Трансформация данных в формат, используемый потребителем, в т.ч. актуальную версию формата, который использует потребитель в данный момент. Данная операция выполняется для всех потребителей, каждого элемента информации.
7. Передача пакета данных для передачи по произвольным интерфейсам.
8. Контроль доставки данных на основании ответов потребителей.
9. Повторная отправка данных в случае временной неработоспособности систем потребителей.
10. Логирование событий интеграции.

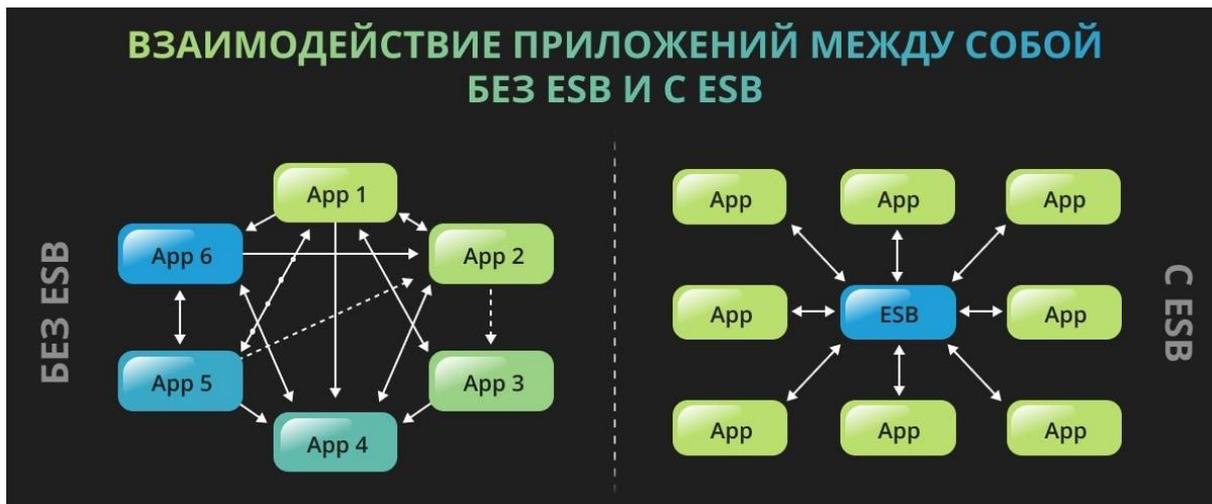


Рисунок 72 – Принцип работы интеграционной шины

Однако даже использование интеграционной шины само по себе не решает всех задач построения качественных интеграционных решений. Требуется правильно спроектировать интеграционные потоки. Ниже сформулированы основные принципы интеграции решений:

1. Используется событийная модель интеграции, объекты выгружаются в шину данных в момент совершения события. Исключаются периодические передачи больших массивов данных между системами, что само по себе повышает вероятность отказа систем.
2. Для каждого элемента данных системы определяется один или несколько первоисточников (с исключением возможности пересечения).
3. Для каждого объекта данных может быть множество систем потребителей.
4. Каждый объект данных при создании/ изменении выгружается в шину данных один раз.
5. Шина осуществляет маршрутизацию данных по системам потребителям в соответствии с маршрутами и фильтрами.
6. Шина осуществляет необходимую трансформацию данных.
7. Изменение объекта в потребителе выполняется локально, возможна каскадная передача данных в потребители следующих уровней.

8. Обратная синхронизация данных не выполняется.
9. Централизованное управление потоками: маршруты, мониторинг, форматы данных и версионность.

Архитектура решений, построенных с использованием интеграционной шины значительно нагляднее и проще, что создает потенциал развития информационной системы в целом. При этом в отдельных случаях, где использовать шину невозможно, могут оставаться отдельные интеграционные потоки типа «точка-точка». Такая ситуация характерна для передачи информации в закрытых форматах, или когда требования законодательства явным образом фиксируют инструменты передачи данных без посредников. Такие интеграции как правило создаются с внешними системами, что минимизирует влияние отказов на работы системы в целом.

На рисунке 73 представлен пример построения информационной системы машиностроительного предприятия с использованием интеграционной шины.

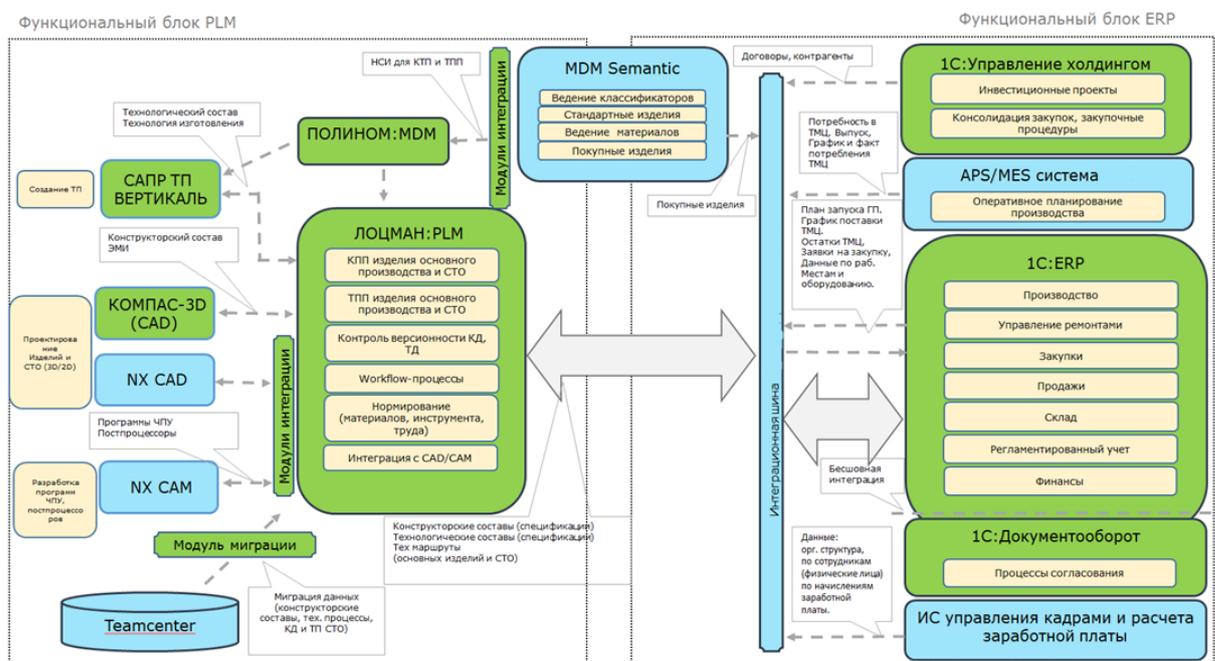


Рисунок 73 – Пример архитектуры с использованием интеграционной

ШИНЫ

Подводя итог следует отметить, что для развития информационной системы в интеллектуальную систему управления необходимо упорядочивание интеграционных потоков в информационной системе с исключением информационных разрывов, искажений и потери информации. Только в этом случае интеллектуальная система управления сможет работать адекватно.

5.5. Подходы к реализации интеллектуальных элементов

Согласно предлагаемой концепции интеллектуальные элементы встраиваются в существующую на предприятии ERP-систему, однако практическая реализации встраивания элементов может быть различной. Как уже было сказано выше практически все ERP-системы, существующие на рынке, имеют встроенные механизмы внесения изменений в бизнес-логику работы системы и настройках. Кроме того, получили свое развитие механизмы расширения функциональности без снятия решения с поддержки и возможностью быстрого отключения таких расширений. Также большая часть систем имеет встроенные средства для интеграции системы с окружением. Данное направление развития является ключевым для развития ERP-систем.

Для практической реализации компонентов интеллектуальной системы управления производством (далее Системы) потребуется как разработка математического аппарата, так и собственно программная реализация вкупе с компонентами интеграции или же инкапсуляции системы в существующую ERP-систему предприятия.

Рассмотрим 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 последовательно все три подхода к реализации.

Доработка типовой

Доработка типовой конфигурации ERP-системы является самым очевидным, простым и нетрудоемким способом реализации. В рамках конфигурации может быть разработана отдельная подсистема, которая реализует необходимый функционал используя объекты основной конфигурации. Такой путь выбирают множество компании при развитии и адаптации решений по требованиям заказчика. За годы использования данного подхода сформулированы и хорошо изучены проблемы, которые возникают у заказчиков:

1. Проблемы с обновлением на новые версии основной конфигурации ERP-решения. При выходе новой версии конфигурации приходится объединять старую и новую конфигурацию с учетом доработок. Этот процесс может быть крайне трудоемким, приводить к появлению ошибок и неработоспособности конечного решения. Именно проблемы с обновлениями конфигурации являются причиной того, что данный подход на сегодня теряет популярность.
2. Невозможность отделить собственный программный код от программного кода основной конфигурации. Это также создает проблемы в сопровождении, но компании с развитыми процессами разработки и сопровождения решений успешно научились решать такие проблемы используя специальную разметку программного кода.
3. Крайняя сложность при попытке переноса решения на другую конфигурацию системы, и полная невозможность работы решения на другой программной платформе. Даже для компаний, которые не занимаются продуктовой разработкой данное ограничение может быть важным. Часто компании меняют ERP-решение на

новое (так, например, было при выходе «1С ERP Управление предприятием 2» после завершения развития «1С Управление производственным предприятием»).

Расширения

Расширения конфигурации позволяют значительно упростить адаптацию типового прикладного решения к потребностям конкретного внедрения, конкретного заказчика. Стратегия, предлагаемая расширениями, заключается в том, что изменять типовую конфигурацию не нужно. Все изменения выполняются в расширении, которое, по сути, тоже является конфигурацией. После этого расширение просто подключается к типовой конфигурации. Платформа автоматически объединяет расширение с типовой конфигурацией. В результате разработанные компоненты системы автоматически встраиваются в измененную конфигурацию без изменения кода самой конфигурации. Когда поставщик выпускает новую версию типовой конфигурации, выполняется её автоматическое обновление, поскольку режим поддержки типовой конфигурации не менялся. Она осталась на полной поддержке поставщика. А при запуске обновлённого прикладного решения платформа снова автоматически объединит изменённую типовую конфигурацию с расширением. И заказчик продолжает работать с изменённым, по его желаниям, типовым решением.

Расширения часто используют, когда прикладное решение работает в режиме разделения данных. Например, в модели сервиса. Тогда один из абонентов может использовать дополнительные компоненты системы, в то время как остальные абоненты хотят работать с неизменной типовой конфигурацией. Тогда именно этому абоненту можно разработать расширение, в котором и реализовать необходимую функциональность. Абонент подключит себе это расширение и будет работать с изменённой конфигурацией. В то время как для остальных абонентов никаких изменений не произойдет. Потому что все расширения подключаются и

запускаются в разрезе текущих значений разделителей. При этом существует возможность применить расширение и для всех областей разделённой информационной базы.

Другая ситуация – это доработки типовой конфигурации под конкретного заказчика. Если все эти доработки выполнить в расширении, то типовая конфигурация останется на полной поддержке, что значительно упростит её дальнейшее сопровождение.

Важной особенностью расширения является наличие заимствованных объектов. Позаимствовать можно любой объект типовой конфигурации с помощью команды контекстного меню. Заимствованные объекты нужны расширению для того, чтобы быть уверенным в том, что в типовой конфигурации есть все те объекты и их свойства, которые необходимы для правильной работы расширения. При каждом подключении расширение проверяет, что заимствованные объекты не изменились в основной конфигурации.

Проверить возможность применения расширения к конкретной конфигурации можно до её реального запуска вместе с конфигурацией. Важной характеристикой расширения является его назначение. Оно выбирается из нескольких фиксированных значений, предусмотренных в платформе. Назначение должно соответствовать той функциональности, которая реализована в расширении, потому что порядок применения расширений к информационной базе определяется именно их назначением. В первую очередь применяются расширения с назначением Исправление, затем Адаптация, после этого Дополнение. Такой подход позволяет избежать конфликтов между функциональностью расширений с разным назначением.

Система позволяет деактивировать расширения. Деактивированные расширения не применяются к конфигурации, при этом оставаясь в информационной базе. Это позволяет посмотреть, как конфигурация

работает без расширения. Такая возможность особенно востребована для расширений, дорабатывающих прикладные объекты конфигурации, так как удаление таких расширений влечёт за собой потерю расширенных данных.

Недостатки у такого подхода, следующие:

1. Достаточно высокая сложность реализации компонентов с использованием данного подхода. Сложность требует привлечения разработчиков высокой квалификации и увеличивает сроки разработки компонентов.
2. Недостаточно развитые средства отладки расширений. При обновлении основной конфигурации расширения могут стать неработоспособным ввиду того, что объекты измененной конфигурации существенно изменились. Не всегда удается быстро понять причину возникновения проблемы. В результате пройдет время прежде, чем проблема будет найдена и устранена.
3. Зависимость от платформы реализации. Расширение может быть использовано только на конкретной платформе и конфигурации, без возможности переноса.

Так или иначе, на сегодняшний день данный подход считается оптимальным при развитии конфигураций ERP под требования заказчиков. Также хорошо данный подход может быть использован при создании интеллектуальных элементов.

Внешний сервис

Подход с внешним сервисом является наиболее сложным, но при этом открывает широкие возможности в реализации.

При использовании данного подхода разрабатываются или адаптируются следующие компоненты:

1. Основной сервис обработки данных. В нем реализуется основная логика работы интеллектуального элемента.

2. Компоненты сбора и подготовки исходных данных для работы сервиса.
3. Компоненты подготовки и передачи выходных данных работы сервиса.
4. Интеграционная шина передачи данных. Как правило данный компонент не является частью системы. Многие предприятия используют интеграционные шины в своей работе, например RabbitMQ или Kafka, таким образом как таковая разработка и адаптация не потребуются, только настройка подписок.
5. Компоненты отправки и сбора данных в ERP – это единственный зависимый от платформы набор компонентов. Если не используется стандартный API, то в ERP придется встроить необходимые компоненты, которые будут позволять отправлять необходимые для работы сервиса данные и принимать, и сохранять результаты обработки.

Для реализации Системы может быть выбрана произвольная программно-аппаратная платформа. Данная схема содержит минимальное количество связей, а, следовательно, минимизирует сложность задачи интеграции информационных систем. Данные, необходимые для работы Системы забираются из ERP-системы. Далее осуществляется решение задачи оптимизации, и информация передается обратно в ERP.

Основным преимуществом данного подхода является возможность использования оптимальной платформы для решения задач. Поскольку речь идет о решении математических и оптимизационных задач возможно оптимально подойдет Python с его обилием готовых математических библиотек. Также с использованием такого подхода можно реализовать мульти-платформенное решение, которое может быть использовано на разных ERP-системах и даже одновременно, что особенно актуально

холдинговым структурам, в которых могут использоваться различные ERP-решения.

К недостаткам такого решения можно отнести следующие аспекты:

1. Высокая сложность в реализации решения. Требуется реализация и отладка интеграционных компонентов, которые всегда «дороги». Также потребуются привлечение разработчиков под разные платформы.
2. Высокая стоимость поддержки, вызванная необходимостью поддерживать работоспособность нескольких систем на разных платформах, что также может потребовать содержания в штате отдельных специалистов.

В целом такой подход является наиболее универсальным и масштабируемым. Хорошо подойдет для продуктовой разработки, когда компоненты выпускаются на рынок как отдельные продукты, расширяющие возможности типового решения.

В заключение следует отметить, что каждый из подходов имеет свои плюсы и минусы, но все они являются рабочими, и позволяют в сжатые сроки обеспечить необходимые результаты. Использование ERP как основной системы позволяет достигать результаты быстро, не неся затраты на повторное внедрение и замену информационных систем, как это часто практиковалось ранее. В рамках данной работы использовались все три подхода к реализации интеллектуальных элементов, выбор подхода осуществлялся исходя из степени влияния интеллектуального элемента на базовый функционал (например модуль MES реализован как расширение, а модуль синхронизации как внешний сервис), необходимостью создания новых объектов метаданных, широко используемых в различных модулях системы (для таких случаев как правило выбирают доработку основной конфигурации, хотя возможна и реализация в виде расширения основной конфигурации)

5.6. Техническое описание решения

На сегодняшний день уровень применения лучших практик оптимизации производственных процессов в стандартных механизмах ERP-систем крайне низок. 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 вкупе с компонентами интеграции.

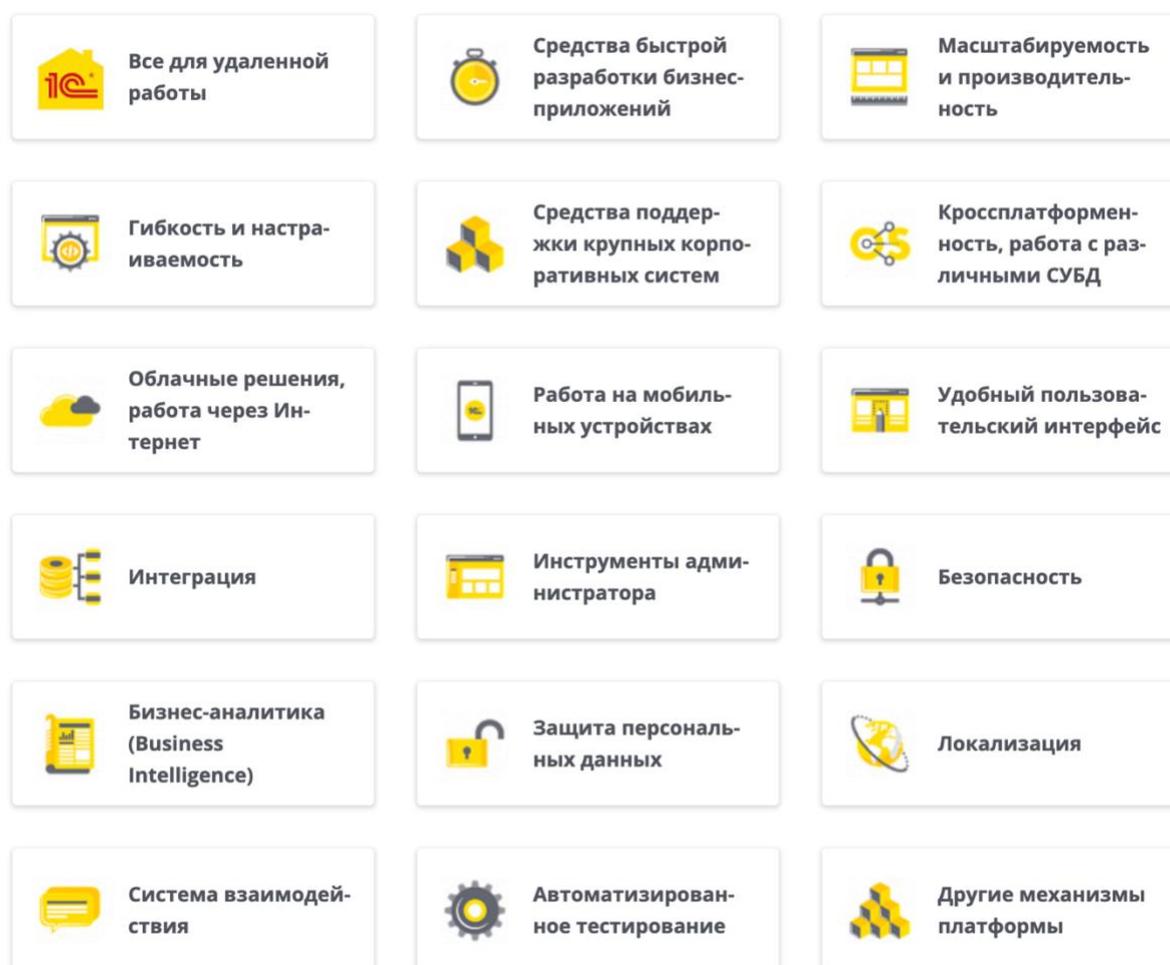


Рисунок 74 – Основные возможности технологической платформы 1С:
Предприятие

Система программ «1С:Предприятие» состоит из технологической платформы (ядра) и разработанных на ее основе прикладных решений

(«конфигураций»). Такая архитектура системы принесла ей высокую популярность, поскольку обеспечивает открытость прикладных решений, их функциональность и гибкость, короткие сроки внедрения, высокую производительность, масштабируемость от одного до десятков тысяч рабочих мест, работу в режиме «облачного» сервиса и на мобильных устройствах. Платформа «1С:Предприятие 8» успешно применяется для повышения эффективности управления и учета более чем в 1 500 000 организаций, от малого бизнеса и индивидуальных предпринимателей до крупнейших корпораций и госструктур.

Преимуществами «1С:Предприятие» являются высокая скорость разработки прикладных решений и низкий порог вхождения разработчиков в технологию. Существенная часть разработки бизнес-приложений ведется в концепции декларативного программирования, без написания кода. Широко используется визуальное редактирование, что позволяет свести объем собственно программирования к минимуму (парадигма разработки low-code, «минимальное программирование»). Для написания программного кода используется высокоуровневый предметно-ориентированный язык с понятийной моделью, максимально приближенной к задачам бизнеса (реализован подход Domain-Driven Design – предметноориентированное проектирование).

Прикладные решения на платформе «1С Предприятие 8» поставляются в открытых исходных кодах. Благодаря используемым парадигмам визуального проектирования и предметной ориентированности языка системы этот код является реально открытым — представители заказчика могут легко его прочитать, разобраться в бизнес-логике прикладных решений, поддерживать и развивать их, модифицировать и расширять функционал в соответствии с задачами организации. Реальная открытость прикладных решений «1С Предприятие 8» позволяет легко передавать их для развития или на сопровождение от одних специалистов другим,

например, от внедренческой фирмы в ИТ-службу организации-пользователя.

«1С Предприятие» является кроссплатформенной системой, работающей с различными СУБД:

1. Серверы приложений могут функционировать в ОС Microsoft Windows и Linux.
2. Исполняемый клиент приложений «1С:Предприятия 8» работает в ОС Microsoft Windows, Linux, macOS.
3. Мобильный клиент работает на мобильных устройствах под управлением ОС Android, iOS, Windows.
4. Веб-клиент работает в различных интернет-браузерах: Google Chrome, Firefox, Safari, Microsoft Internet Explorer, Microsoft Edge.
5. Поддерживает работу с Microsoft SQL Server, PostgreSQL, IBM DB2, Oracle Database и файловой СУБД собственной разработки «10».

Безопасность платформы обеспечивает разграничение и контроль доступа к данным (в том числе на уровне записей и полей базы данных), сохраняется история изменений данных. Механизм поддержки криптографии обеспечивает набор объектов, позволяющих взаимодействовать с внешними модулями криптографии сторонних производителей, и позволяет прикладным решениям использовать криптографические операции для обработки данных приложения. Поддерживаются различные способы аутентификации пользователей прикладных решений: аутентификация средствами платформы «1С:Предприятие 8», аутентификация средствами операционной системы, аутентификация по стандарту OpenID и Open ID Connect. Поддерживается также двухфакторная аутентификация и биометрическая аутентификация.

На рисунке 75 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 75 – 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. Из аналогов был выбран RabbitMQ [226, 227, 228], который работает как кластер узлов, где очереди распределяются по узлам и реплицируются в целях устойчивости к ошибкам и высокой доступности. RabbitMQ позволяет взаимодействовать различным программам, является хорошо зарекомендовавшим себя решением для построения SOA (сервис-ориентированной архитектуры) и распределением отложенных ресурсоемких задач. RabbitMQ – это брокер сообщений, применяемый для отправки и получения сообщений с принципом работы почтового отделения, когда одна система бросает письмо в ящик, почтовое отделение гарантирует, что рано или поздно почтальон доставит его адресату. RabbitMQ имеет возможности гибкой маршрутизации, что делает систему уникальной.

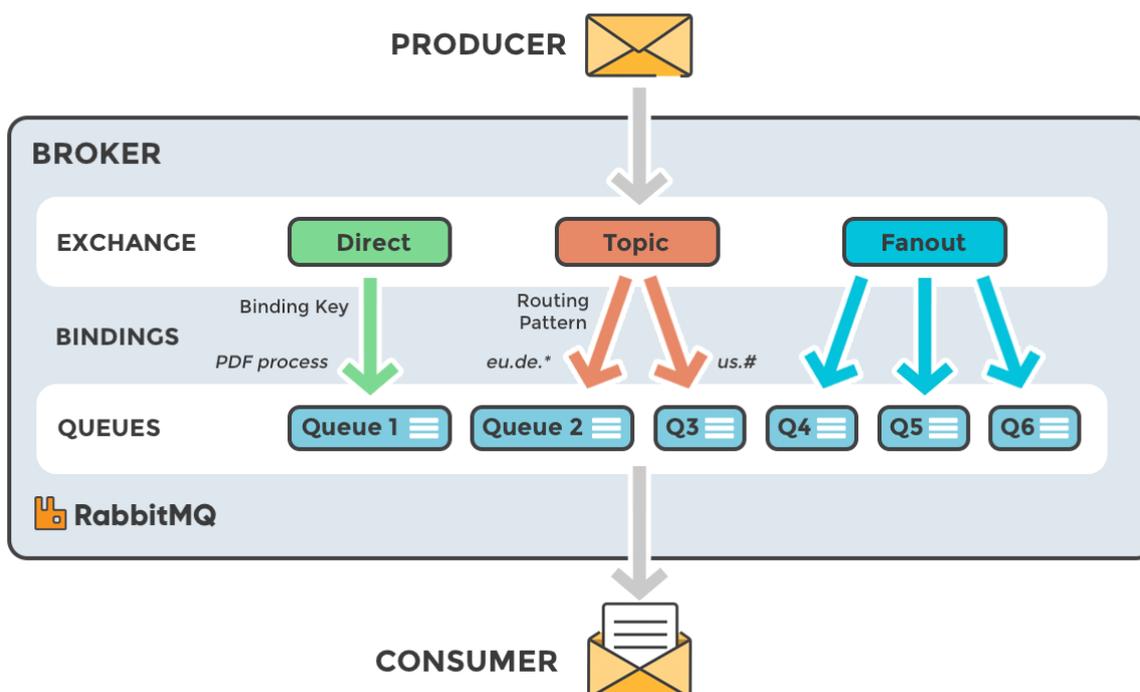


Рисунок 76 – Принцип работы RabbitMQ

В интеграции участвуют следующие компоненты:

1. **Producer** (поставщик) – программа, отправляющая сообщения. Этот компонент системы встроен в 1С:ERP для отправки данных о производстве. Аналогичный компонент встроен в систему синхронизации для передачи потока данных о состоянии партий обработки.
2. **Queue** (очередь) – имя «почтового ящика». Она существует внутри RabbitMQ. Хотя сообщения проходят через RabbitMQ и приложения, хранятся они только в очередях. Очередь не имеет ограничений на количество сообщений. Для каждого элемента данных (заказ на производство, этап производства, и т.д.) создается своя очередь, в которую записываются сообщения обо всех новых и измененных записях.
3. **Consumer** (подписчик) – программа, принимающая сообщения, находящаяся в состоянии ожидания сообщений. Подписчик встроен в систему синхронизации (для чтения изменений в

производственных заказах), а также в 1С:ERP для чтения данных о состоянии партий обработки.

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. В традиционных вариантах сервис-ориентированной архитектуры модули могут быть сами по себе достаточно сложными программными системами, а взаимодействие между ними зачастую полагается на протоколы SOAP, XML-RPC и др, в микросервисной архитектуре системы выстраиваются из компонентов, выполняющих относительно элементарные функции, и взаимодействующие с использованием экономичных сетевых коммуникационных протоколов (JSON, Protocol Buffers, Thrift).

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. Таким образом выбранная архитектура обладает следующими свойствами:

1. модули можно легко заменить в любое время: акцент на простоту, независимость развёртывания и обновления каждого из микросервисов;
2. модули организованы вокруг функций: микросервис выполняет только одну достаточно элементарную функцию;
3. модули могут быть реализованы с использованием различных языков программирования, фреймворков, связующего программного обеспечения, выполняться в различных средах контейнеризации, виртуализации, под управлением различных операционных систем на различных аппаратных платформах: приоритет отдаётся в пользу

наибольшей эффективности для каждой конкретной функции, нежели стандартизации средств разработки и исполнения;

4. архитектура симметричная, а не иерархическая: зависимости между микросервисами одноранговые.

Сервисы разрабатывались на языке С# как отдельные приложения упаковываемые в так называемые Docker Контейнеры.

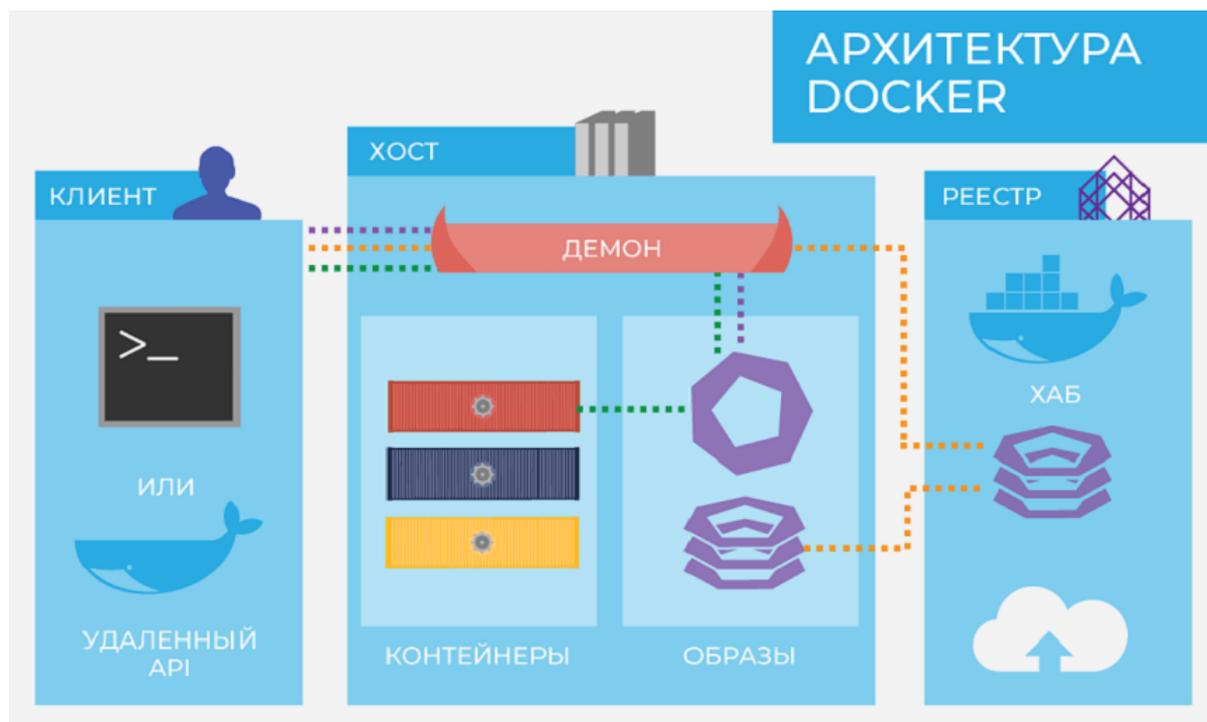


Рисунок 77 – Архитектура Docker

Для запуска контейнеров на множестве хостов и обеспечения масштабирования и балансировки использовался Kubernetes.

С использованием данного инструмента каждый интеллектуальный элемент, состоящий из нескольких микросервисов, оформлялся в Kubernetes как Services.

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: С#
9. Технология исполнения приложений: Docker
10. Система оркестрации микросервисов: Kubernetes.

5.7. Структура интеллектуальной системы управления

Интеллектуальная система управления создается на основании существующей ERP-системы и включает в себя базу знаний предприятия и интеллектуальные элементы [229].

На рисунке 78 представлена схема встраивания модулей интеллектуальной системы управления предприятием в автоматизированные бизнес-процессы компании. В зависимости от специфики предприятия, схема взаимодействия может отличаться, в качестве примера представлена реальная схема функциональной архитектуры одного из предприятий заказчика.

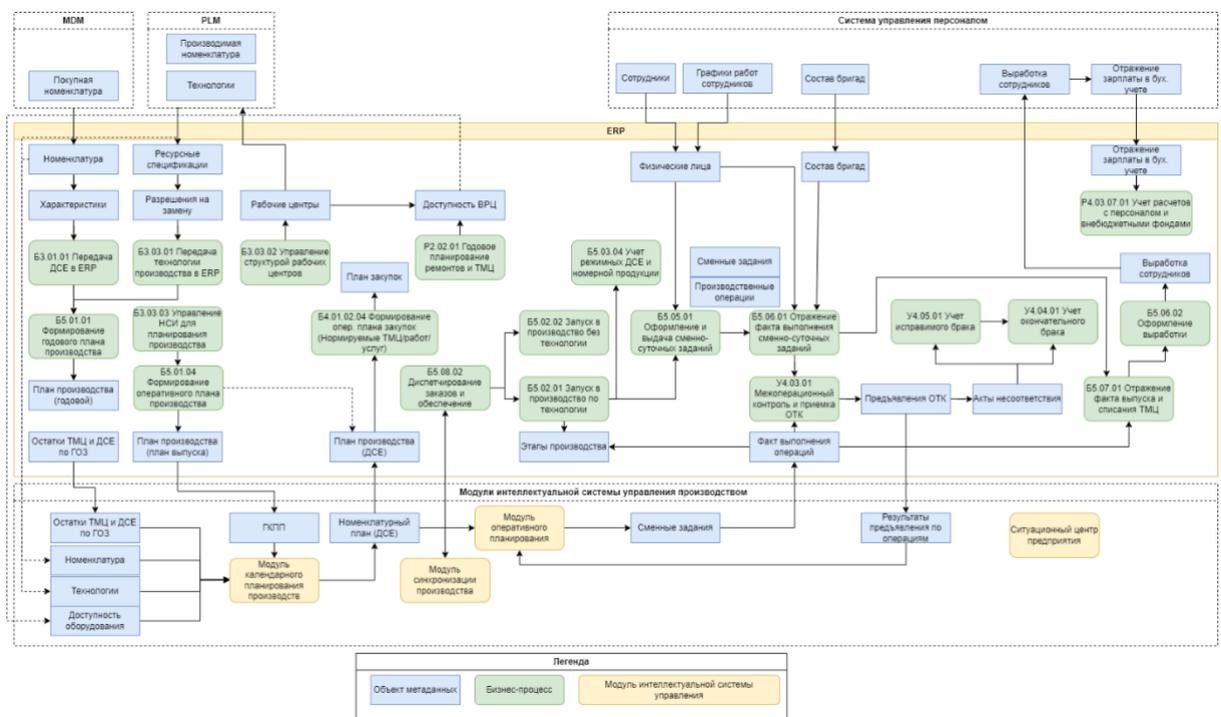


Рисунок 78 – Схема встраивания модулей интеллектуальной системы

В рамках данной работы рассматриваются следующие интеллектуальные элементы [230, 231, 232, 233]:

1. Модуль оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала в условиях нечеткой исходной информации, отличающуюся учетом ограничений на все виды ресурсов,

несколькими критериями оптимальности плана и использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности для построения обобщенного критерия оптимальности.

2. Модуль синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства, отличающуюся от частного решения теории быстрореагирующего производства большей универсальностью и расширенным спектром применения на предприятиях за счет отсутствия требований по изменению производственной логистики.
3. Модуль оптимального управления производством на оперативном уровне управления 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 адекватного решения.
4. Ситуационный центр предприятия, осуществляющий поддержку принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия, которая способна учитывать специфику предметной области и дополнительные ограничения.

Рассмотрим структуру массивов данных (объектов метаданных), используемых в работе интеллектуальной системы управления.

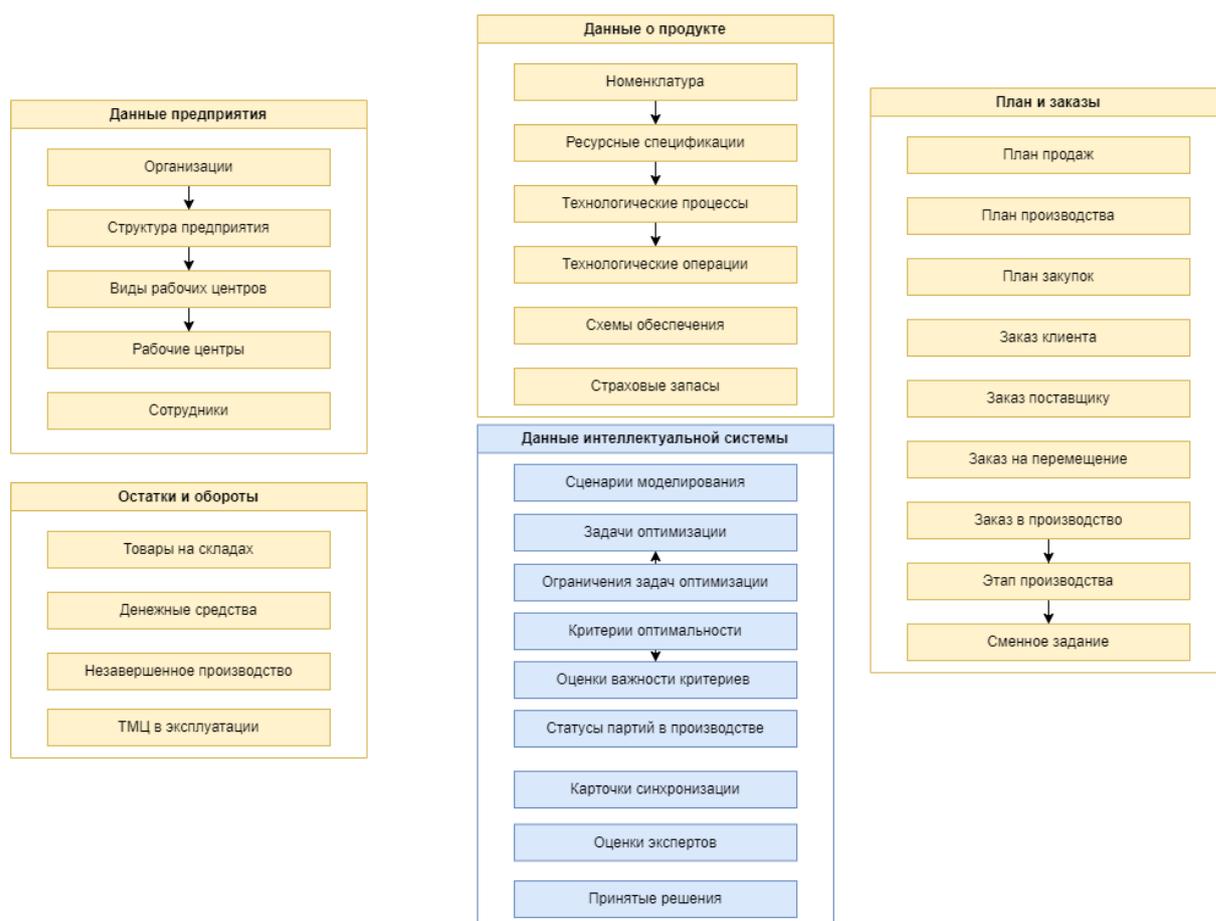


Рисунок 79 – Структура базы данных интеллектуальной системы управления

В базовой конфигурации ERP уже предусмотрены объекты метаданных с необходимыми реквизитами для хранения необходимой интеллектуальной системе управления информации (все блоки кроме данных интеллектуальной системы). Данные, хранящиеся в документах и справочниках дополнены регистрами накопления, которые содержат остатки и обороты по всем движениям, что позволяет как получать данные об остатках на заданную дату, так и анализировать статистику выполнения хозяйственных операций. Такой относительно небольшой набор объектов позволяет достаточно детально описать материальные потоки предприятия, что создает базу для решения задач планирования, синхронизации и поддержки принятия решений.

Кроме объектов стандартной конфигурации в систему добавлены объекты данных, необходимые для хранения дополнительной информации, необходимой для постановки, решения и хранения результатов решения задач управления [234]. Кроме того, в систему добавлен компонент базы знаний, его описание будет представлено в следующем разделе, а ниже представлено краткое описание созданных объектов.

Сценарии моделирования

Справочник Сценарии моделирования [235] – позволяет создавать в системе множество сценариев моделирования, часть из которых будут использоваться для решения практических задач (планирование производства, синхронизация и т.п.), а часть для задач моделирования сценариев развития, обучения и прогнозирования [225]. На рисунке 80 представлен состав основных реквизитов объекта.

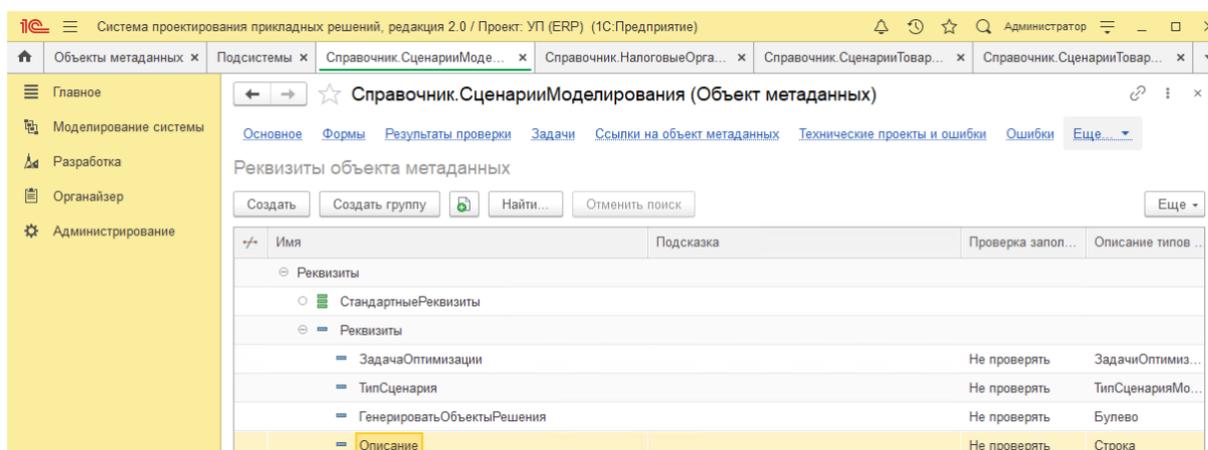


Рисунок 80 – Реквизиты справочника Сценарии моделирования

Создавая элементы справочника можно создать произвольное количество сценариев. Тип сценария указывает на назначение использования сценария: решение практической задачи, моделирование, прогнозирование, обучение. В поле Генерировать объекты решения указывается, следует ли создавать утвержденные документы по результатам принятых решений. Например, при решении задачи планирования производства создается документ План производства, в случае, если Генерировать объекты решения равно Ложь – планы производства созданы

не будут. Таким образом можно использовать интеллектуальные элементы в разных сценариях моделирования, без опасения нежелательного влияния на процессы предприятия.

Задачи оптимизации

Перечисление «Задачи оптимизации» – содержит перечень доступных для решения задач оптимизации, которые могут быть использованы самостоятельно или же в рамках ситуационного центра, для генерации множества возможных альтернатив. При добавлении в систему новых интеллектуальных элементов – перечень задач расширяется, что создает необходимую основу для дальнейшего развития системы [226]. Реализация принципа открытого интерфейса системы интеллектуальные элементы могут использоваться как для непосредственного решения задачи, так и в рамках процесса моделирования возможных состояний системы, решения задач «что если?» и обучении новых сотрудников в рамках ситуационного центра предприятия.

Ограничения задач оптимизации

Справочник «Ограничения задач оптимизации» – в соответствии с концепцией системы с открытым интерфейсом позволяет добавлять к задачам произвольное число дополнительных математических выражений общего вида, в качестве переменных, в которых могут выступать любые информационные массивы системы. На рисунке 81 представлен реквизитный состав справочника.

Имя	Подсказка	Проверка заполнения	Описание типов значения
Реквизиты			
СтандартныеРеквизиты			
Реквизиты			
ТипОграничения		Не проверять	ТипОграничения
ЗапросАij		Не проверять	Строка, Запрос
ЗапросВi		Не проверять	Строка, Запрос
ЗадачаОптимизации		Не проверять	ЗадачаОптимизации
Сценарий		Не проверять	СценарийМоделирования

Рисунок 81 – Реквизитный состав ограничения

Для того, чтобы добавить ограничение в задачу оптимизации необходимо указать задачу, к которой ограничение будет применено и сценарий, в котором данное ограничение будет использоваться. Если поле Сценарий не заполнено – ограничение будет использоваться для решения всех задач данного вида, являться общим.

В данной реализации поддерживается создание дополнительных ограничений основной задачи линейного программирования вида: $\sum a_{ij}x_j \geq b_i$. Для удобства использования тип ограничения позволяет также задавать значения:

1. Больше или равно;
2. Меньше или равно;
3. Строго больше;
4. Строго меньше;
5. Равно.

В поле ЗапросAij – должен храниться текст запроса или же ссылка на запрос, в результате которого будет сформирована матрица значений a_{ij} . Для того, чтобы система могла понять переходы между значениями i используется оператор запроса |С сгруппировать по.

Если ограничение состоит из одного неравенства, то можно использовать обычный запрос. Например, параметры a_{ij} для одного ограничения может быть получено запросом без группировки – рисунок 82. При этом из результатов запроса будут взяты значения, которые находятся в первом столбце таблицы. Если значения принимают нечисловую форму – пользователь получит сообщение об ошибке, решение задачи будет приостановлено.

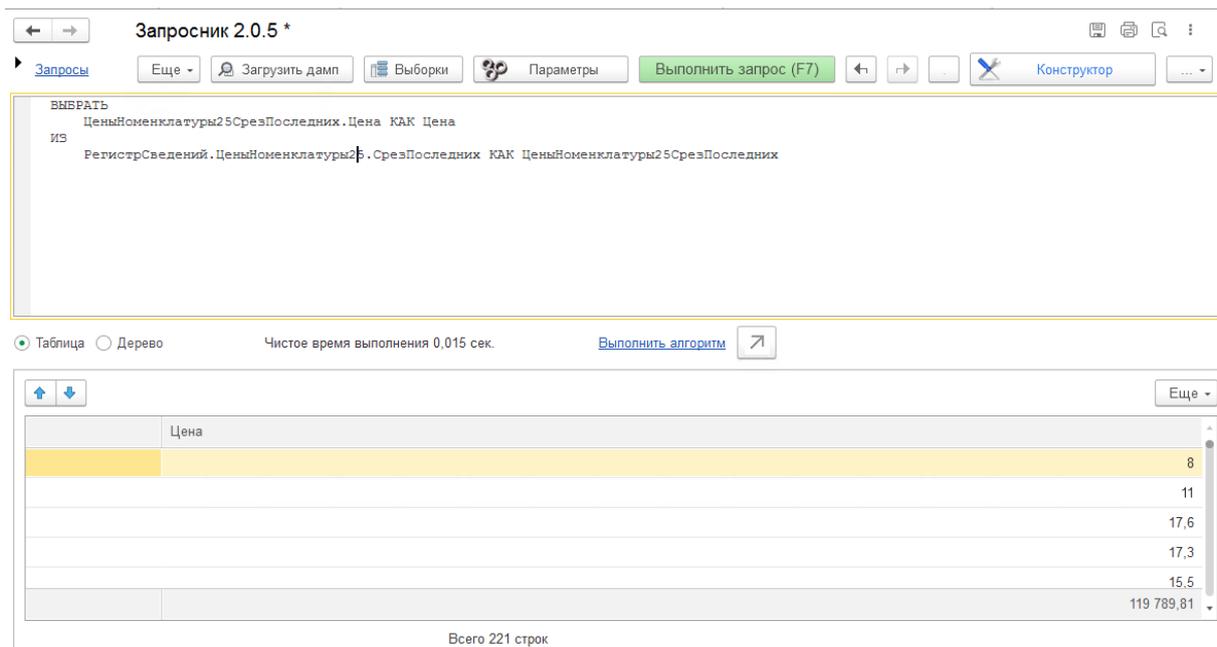


Рисунок 82 – Результат выполнения запроса

Для задания ограничений в виде системы неравенств, необходимо сделать запрос с двумя группировками, где первая группировка будет рассматриваться как i , а вторая как j . На первом месте в запросе должны быть значения a_{ij} , на втором значение, по которому будет строиться индекс j , на третьем значения, используемые для построения индекса i . Пример такого запроса представлен на рисунке 83.

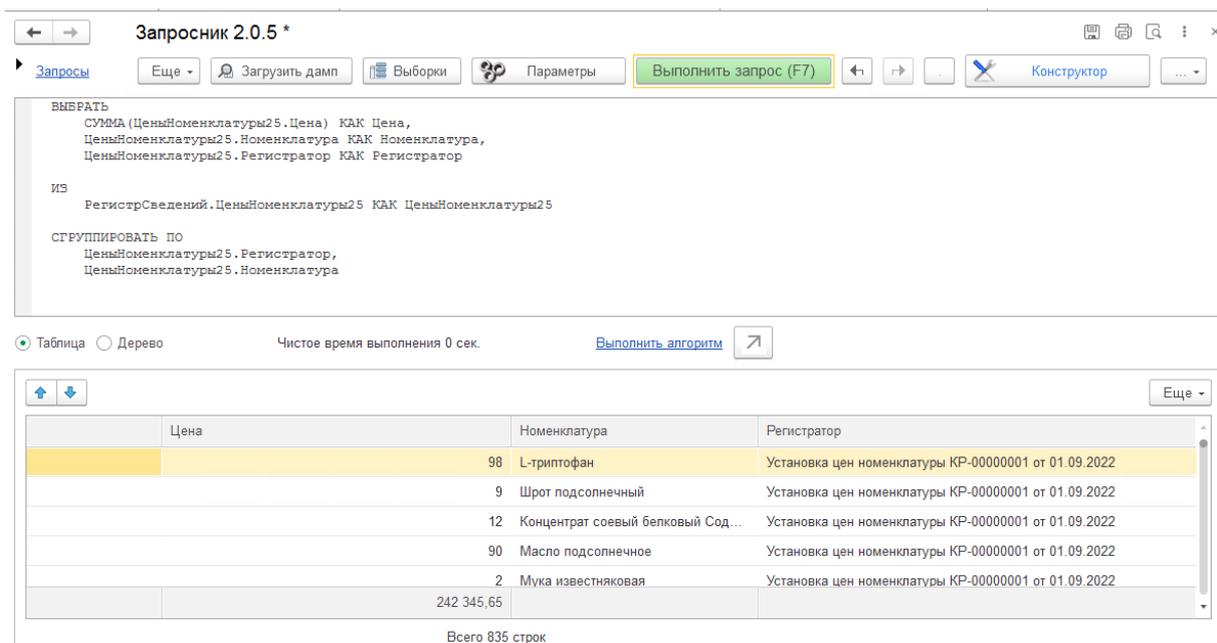


Рисунок 83 – Пример запроса ограничения

На практике, данный механизм не должен использоваться без дополнительных программных компонентов, которые будут готовить данные для ограничений. При каждом запуске решателя задачи оптимизации количество переменных может отличаться (например, при добавлении или исключении позиций плана производства), таким образом обращение напрямую к регистру цен номенклатуры приведет к тому, что индекс будет построен неправильно, так как будет передана цена на позицию, которая была из плана исключена [236].

Рекомендуется использовать следующий алгоритм работы с дополнительными ограничениями:

1. Запуск решателя задачи оптимизации, построение задачи оптимизации (всегда возможно до начала решения).
2. Получение списка переменных, построенных задачей оптимизации (доступно в служебных регистрах).
3. Запуск дополнительного механизма расчета параметров ограничения – разрабатывается под каждый вид ограничений дополнительно.
4. Расчет параметров дополнительных ограничений.
5. Запись параметров дополнительных ограничений в служебный регистр сведений.
6. Финальная проверка размерности данных в служебном регистре с размерностью задачи оптимизации (количество значений параметра a_{ij} должно быть одинаковым для всех i и быть равным количеству переменных в задаче оптимизации), также и порядок расположения элементов должен совпадать.

Субъективно, данный алгоритм выглядит слишком сложным, но на практике решение задачи оптимизации на порядок сложнее, чем решение задачи подготовки данных. Если бы система не обладала механизмом добавления дополнительных ограничений, то необходимость учесть новое

ограничение порождало бы необходимость повторного решения самой задачи. Такой интерфейс, хоть и сложен в использовании, но для подготовки данных не потребуются использование математического аппарата, достаточно разработать алгоритм подготовки данных.

Критерии оптимальности

Перечисление «Критерии оптимальности», содержит базовый набор критериев оптимальности с дополнительными реквизитами. Данный объект позволяет со временем развивать механизмы планирования и также реализует концепцию открытого интерфейса, позволяя добавлять новые критерии при доработках системы. Здесь следует отметить, что добавление дополнительного критерия к задаче оптимизации не позволит автоматически найти решение задачи. Потребуется полный цикл поиска решения задачи оптимизации, с учетом добавленного критерия оптимизации. На практике рекомендуется использовать возможность добавления критериев только в случае крайней необходимости, при изменении бизнес-модели работы предприятия. Механизм дополнительных ограничений может быть использован также, для исключения решений, неоптимальных по дополнительному критерию оптимизации.

Оценка важности критериев оптимальности

Документ «Оценки важности критериев оптимальности» позволяет задать оценки важности критериев оптимальности в привязке к задачам оптимизации и сценариям моделирования, таким образом создается база для расчета важности критериев оптимальности при решении задач. При решении задач оптимизации в интерфейсе указывается ссылка на документ оценки важности критериев оптимальности, который используется для решения задачи в данный момент [237, 238]. Данный документ является ключевым для настройки алгоритмов оптимизации и содержит в себе как экспертные оценки важности критериев, так и результаты обработки экспертных оценок, предоставляя задаче оптимизации итоговые значения.

При этом в документе предусмотрены различные алгоритмы расчета итоговых значений важности:

1. Усреднение оценок.
2. Усреднение оценок с учетом квалификации экспертов, устанавливаемой ответственным лицом, принимающим решения.
3. Усреднение оценок с исключением аномалий (используется при оценке критериев большими группами экспертов).

В табличных частях документа «Эксперты» и «Оценки экспертов» содержатся первичные данные о рабочей группе экспертов (с оценкой квалификации каждого эксперта) и их оценках критериев соответственно.

Статусы партий в производстве

Периодический регистр сведений «Статусы партий в производстве» – используется для хранения решения задачи Синхронизации производства. Данный регистр содержит ссылки на документ этап производства, дату состояния и статус этапа производства на дату расчета. В данный регистр выгружаются результаты решения задачи синхронизации производства, на данных данного регистра работают табло визуализации состояния производства в цехе и инструменты диспетчирования.

Карточки синхронизации

Справочник «Карточки синхронизации» – используется для создания настроек синхронизации цехов в соответствии со спецификой материального потока предприятия. Элементы карточки синхронизации создаются для создания дополнительных пар передачи партий. Более подробно принцип работы карточек описан в разделе 3.2.

Оценки экспертов

Документ «Оценки экспертов» – используется для хранения предпочтений экспертов, в задачах принятия коллективных решений [227]. В табличных частях документа хранится информация об оценках экспертов по каждой предлагаемой альтернативе.

Принятые решения

Документ «Принятые решения» – используется для хранения информации о принятых при решении задачи решениях. Содержит табличную часть с предлагаемыми альтернативами, их итоговыми оценками и выбранным вариантом решения. Кроме того, каждая альтернатива может содержать ссылку на объект метаданных информационной базы, который содержит детали решения. Данный документ крайне полезен для пост-анализа принятых решений и формирования новых знаний, на основании реализации решений.

5.8. База знаний

Как было сказано в главе 2.2 для практического использования в интеллектуальной системе управления будет использоваться продукционная модель представления знаний в виде правил вида «если-то», т.е. в виде причинно-следственных связей [239]. Использование и формирование базы знаний указано напрямую в постановках задач оптимизации, но не ограничивается местами явного использования. В рамках данной работы была сделана попытка реализации относительно универсального инструмента формирования и использования базы знаний для решения различных задач управления [239]. Для части логических правил были разработаны специализированные программные обработки, а часть правил описывается пользователем самостоятельно путем разработки собственных алгоритмов или формул.

В системе каждое правило имеет следующую структуру:

1. Входные параметры – описывается структура массива данных, которая должна быть предоставлена на входе. Например, оператор поиска аналогичных технологический операций получает на вход две технологические операции, т.е. два объекта информационной базы с типом «технологическая операция».

2. Блок условий – представляет из себя таблицу условий, образующих общее условие «если», каждый элемент условия представляет собой формулу, алгоритм или метод встроенной обработки данных. Условия могут быть скомбинированы в сложное логическое выражение, написанное на встроенном языке 1С, например: «(Условие1 И Условие2>Условие4) ИЛИ Условие3='Низкий'». В результате вычисления выражения должно быть вычислено значение «Истина» или «Ложь». В случае, если типы возвращаемых значений будут несопоставимыми – выполнение алгоритма будет прекращено с ошибкой. Такой универсальный блок условий позволяет достаточно просто создавать несложные правила базы знаний обычным пользователям, что очень важно для системы поддержки принятия решений.
3. Блок выводов – представляет из себя таблицу выводов при выполнении условия. Каждый вывод описывается в формате «значение» и «коэффициент уверенности», что следует трактовать как вывод верен с вероятностью «коэффициент уверенности». В случае, если для блока условий нужно также добавить коэффициенты уверенности, то следует выделить несколько правил для разных условий.

На рисунке 84 представлена логическая модель работы правил базы знаний.

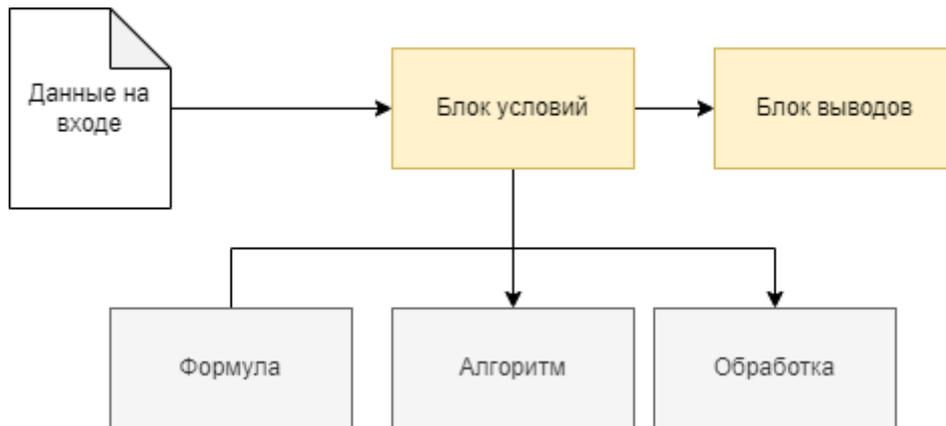


Рисунок 84 – Логическая модель правил базы знаний

В рамках данной работы были созданы обработки блока условий, для получения специализированных знаний, используемых при решении задач оптимизации интеллектуальной системы управления.

На рисунке 85 представлена структура использования базы знаний в рамках данной работы.



Рисунок 85 – Использование базы знаний при решении задач

Алгоритмы поиска аналогичных операций и аналогичной номенклатуры является крайне полезными инструментами, позволяющими существенно повысить качество инженерных данных в системе и исключить информационные разрывы в данных, которые крайне негативно влияют на качество планирования и управления производством в целом.

5.9. Порядок выполнения работ по разработке системы

Подход к разработке ИС был основан на декомпозиции и технической детализации проектных решений. Проектные решения технически детализируются путем разработки заданий на разработку. Согласованные Заказчиком задания на разработку передавались программистам для реализации. Реализованные ЗНР проходят Этап внутреннего тестирования, на котором консультанты проверяют реализацию ЗНР. После завершения внутреннего тестирования по всем ЗНР входящим в ПР, проводится демонстрация прототипа Системы. После реализации доработок по всем ПР в рамках ФО, Система готовится к проведению предварительных испытаний. Общая схема основных вех и документов представлена на рисунке 86.

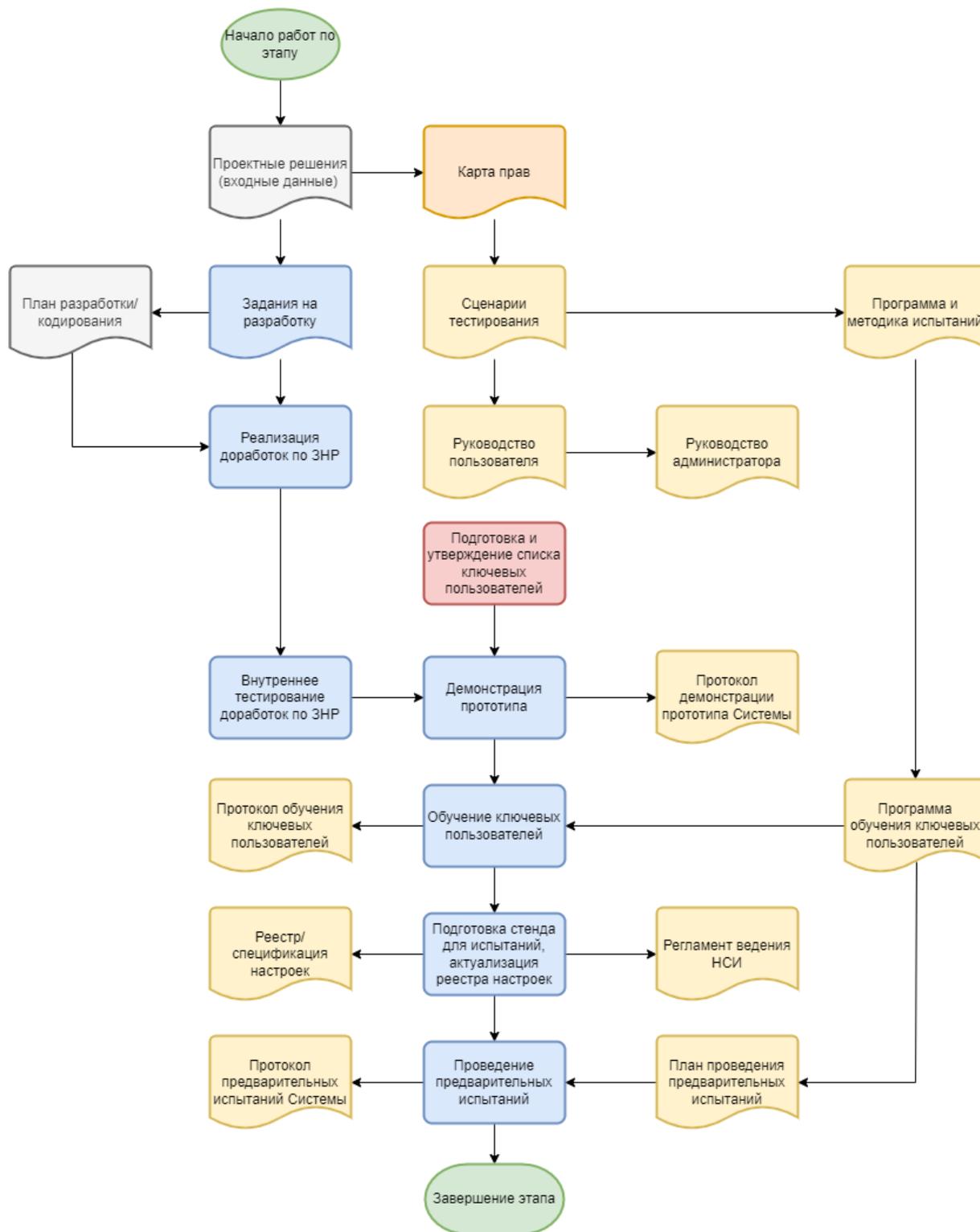


Рисунок 86 – Общая схема основных вех и документов

Ограничения и соглашения действующие на этапе разработки системы:

1. Для подготовки списка ключевых пользователей Заказчик и Исполнитель организуют одно совещание с владельцами процессов, на котором разъясняют задачи и ответственность ключевых

пользователей, и порядок проведения мероприятий на этапе разработки.

2. Демонстрация, тестирование и приемка выполняется с использованием тестовых данных должны, которые должны учитывать специфику бизнес-процессов Заказчика и использовать специфичные для Заказчика элементы НСИ.
3. Своевременное предоставление утвержденного списка ключевых пользователей лежит на стороне Заказчика.
4. Заказчик несет полную ответственность за явку ключевых пользователей на мероприятия этапа разработки: демонстрации, обучение.
5. Пользователи, не явившиеся на демонстрацию/обучение, изучают возможности Системы самостоятельно, на основании материалов записи встреч и предоставленной документации (сценарий, ПМИ, руководства пользователей и администратора).
6. Проведение предварительных испытаний выполняется в очно-заочной форме:
 - Испытания проводятся в соответствии с Программой и методикой испытаний и Планом проведения предварительных испытаний.
 - Старт проведения предварительных испытаний должен быть инициирован приказом о проведении предварительных испытаний Системы, в котором должны быть зафиксированы сроки и ответственность ключевых пользователей.

- После обучения ключевые пользователи получают задание о проведении самостоятельного тестирования функционала системы по ПМИ с использованием тестовых данных.
- В процессе предварительных испытаний, Исполнитель осуществляет консультационную поддержку в рабочее время с 8:00 до 18:00 МСК.
- По результатам самостоятельного тестирования Исполнитель фиксирует поступившие замечания в протоколе проведения предварительных испытаний.

7. Ответственность за своевременное выполнение заданий по самостоятельному тестированию и явку на предварительные испытания лежит на Заказчике.

Выводы по главе

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. С учетом широкого распространения англоязычной конфигурации «1С ERP World Edition» рынок охвата предприятий может увеличиться в несколько раз за счет предприятий со всего мира.

Благодаря использованию интеграционной шины данных и микросервисной архитектуры построения приложений разработанная система является кроссплатформенной, масштабируемой и отказоустойчивой системой, в которой любой компонент может быть изменен в любой момент. Кроме того, система может быть достаточно просто доработана для обеспечения совместимости с другими технологическими платформами и другими ERP-решениями. При

разработке использованы лучшие практики и подходы наиболее актуальные на сегодняшний день.

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.

Инструменты решения задач оптимизации, концепция открытых интерфейсов и инструменты управления знаниями, реализованные в рамках работы, позволило создать интеллектуальную систему управления, не имеющую аналогов среди тиражных решений и позволяющую решать широкий спектр задач управления. При этом алгоритмы, знания и данные, полученные в результате решения задач управления, могут быть использованы повторно, что создает дополнительный потенциал для повышения эффективности системы управления в целом.

Глава 6. Апробация разработанной автоматизированной интеллектуальной системы управления промышленным предприятием в условиях реального производства

6.1. Порядок проведения испытаний системы и ее компонентов

После завершения этапа разработки интеллектуальной системы требуется проведение апробации системы и опытной эксплуатации. В рамках данной главы рассматриваются практические результаты использования интеллектуальной системы, полученные в ходе проведения комплексных испытаний, выполненных в соответствии с требованиями ГОСТ 34.603-92. Для каждого компонента системы были проведены:

- 1) предварительные испытания;
- 2) опытная эксплуатация;
- 3) приемочные испытания.

Предварительные испытания проводились на тестовых наборах данных, максимально приближенных к реальности. Для этих целей как правило использовались реальные данные прошлых периодов.

Для проведения предварительных испытаний доработок ПО собиралась комиссия в составе:

1. Представителей Заказчика;
2. Представителей Исполнителя.

Комиссия осуществляла испытания доработанного ПО посредством проверки результатов выполнения контрольных заданий в соответствии с программой и методикой проведения испытаний.

Критерием правильности выполнения действий в контрольном задании проверок являлось соответствие получаемого при испытаниях результата, результату, указанному в поле «Результат» для соответствующего действия.

Завершением испытаний доработок является демонстрация выполнения всей совокупности контрольных заданий. Результатом проведения

контрольного задания считаются оценки: «принято», «принято с замечаниями» и «не принято».

Критерием готовности доработок к передаче в опытную эксплуатацию считается количество контрольных заданий с результатом «не принято», равное нулю.

Порядок проведения предварительных испытаний:

1. Возникшие в ходе проведения испытаний замечания комиссии вносились в Протокол проведения испытаний (Приложение 1) по мере проведения испытаний.
2. Возникшие в ходе проведения испытаний замечания комиссии устраняются в согласованные между Исполнителем и Заказчиком сроки и порядке:
 - выполняются действия по нахождению причины возникновения ошибки;
 - выполняется дополнительная разработка и настройка ПО, устранение причин ошибки;
3. при необходимости контрольное задание выполняется повторно.
4. В случае выявления несоответствия доработанного ПО отдельным требованиям, Исполнитель проводит устранение выявленных недостатков по результатам испытаний в сроки, согласованные с Заказчиком.
5. По завершении устранения выявленных недостатков проводятся повторные испытания в объеме, требуемом для подтверждения устранения выявленных недостатков.
6. Мелкие, несущественные недоработки могут быть устранены в рабочем порядке.
7. В случае успешного проведения испытаний в полном объеме Исполнитель совместно с Заказчиком на основании Протокола

испытаний утверждают Акт передачи доработанного ПО в опытную эксплуатацию.

После успешного проведения предварительных испытаний проводилась подготовка к опытной эксплуатации. В таблице 28 представлены основные шаги, выполняемые на данном этапе.

Таблица 28 План подготовки к ОЭ

	Мероприятие	Зона ответственности
1	Подготовка плана подготовки к ОЭ	Исполнитель
2	Демонстрация исправления замечаний, зафиксированных в протоколе предварительных испытаний	Исполнитель
3	Подготовка протокола проверки устранения выявленных замечаний	Исполнитель
4	Проведение установочного совещания с владельцами бизнес-процессов	Исполнитель
5	Уточнение списка владельцев бизнес-процессов, выявление дополнительных участников бизнес-процессов	Заказчик
6	Подготовка списка пользователей	Заказчик
7	Подготовка программы ОЭ	Исполнитель
8	Подготовка программы обучения конечных пользователей	Исполнитель
9	Обучение конечных пользователей	Исполнитель
10	Подготовка плана миграции данных для ОЭ	Исполнитель
11	Подготовка стенда для проведения опытной эксплуатации, настройка интеграций, настройка тестовых сервисов и эмуляции оборудования	Исполнитель
12	Подготовка протокола настройки Системы для проведения ОЭ	Исполнитель
13	Создание пользователей и настройка прав	Исполнитель
14	Подготовка программы нагрузочного тестирования	Исполнитель
15	Нагрузочное тестирование	Исполнитель
16	Подготовка протокола нагрузочного тестирования	Исполнитель

17	Миграция данных	Исполнитель
18	Подготовка протокола обучения конечных пользователей	Исполнитель
19	Выверка данных для начала ОЭ	Заказчик
20	Подготовка протокола выверки данных для начала ОЭ	Исполнитель

На рисунке №87 представлена графическая схема последовательности работ на этапе подготовки к ОЭ.

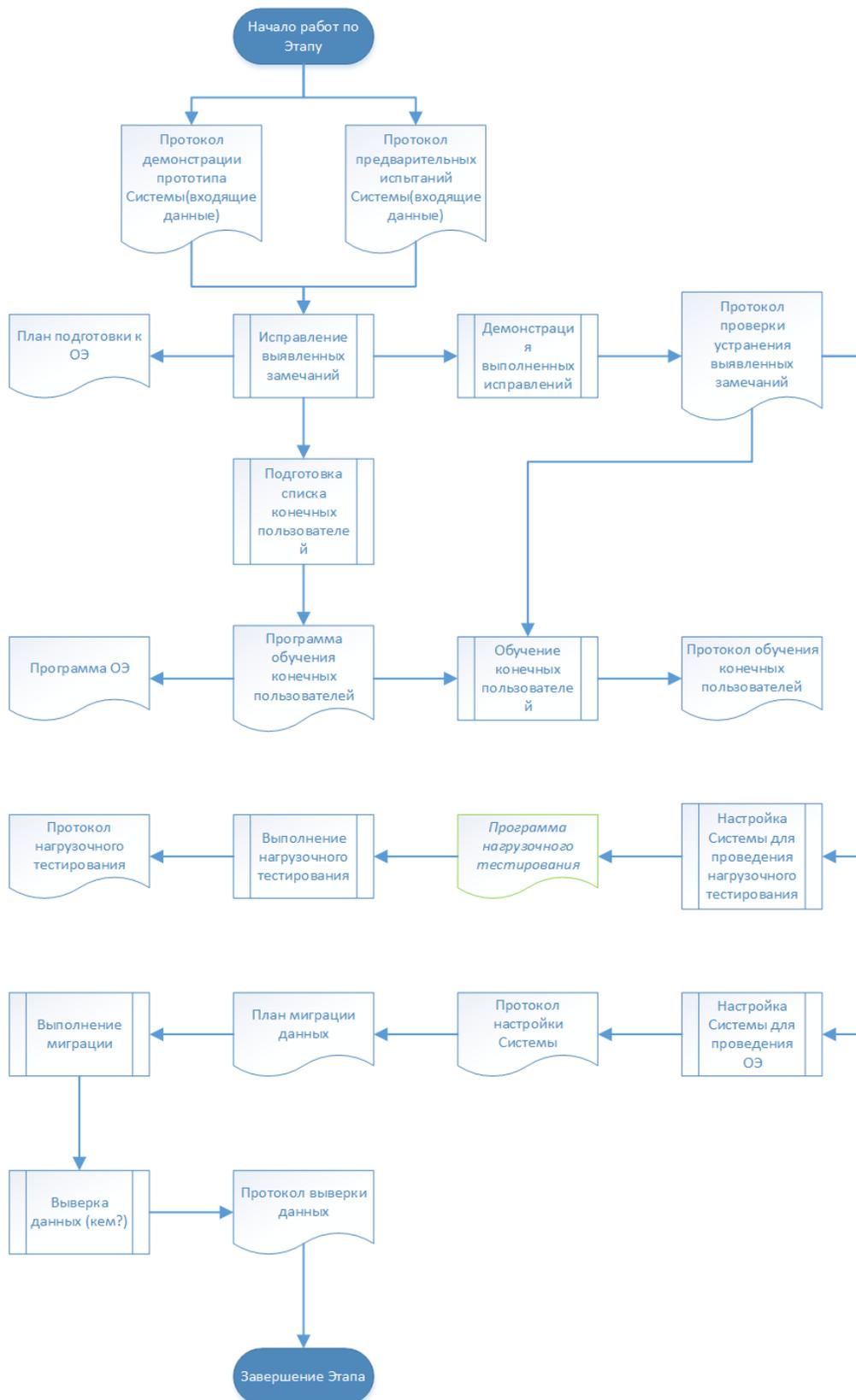


Рисунок 87 – Блок-схема процесса подготовки к ОЭ

По завершению подготовки к ОЭ была проведена опытная эксплуатация в соответствии с программой опытной эксплуатации.

Программа опытной эксплуатации фиксирует рамки проведения опытной эксплуатации, в т.ч.:

1. Условия и порядок функционирования Системы.
2. Продолжительность опытной эксплуатации, достаточная для проверки правильности функционирования Системы при выполнении каждой функции системы и готовности персонала к работе в условиях функционирования Системы.
3. Порядок устранения недостатков, выявленных в процессе опытной эксплуатации.

Длительность опытной эксплуатации системы составляла три месяца, что достаточно для сбора достаточного объема данных, необходимых для оценки качества и эффективности работы системы. При этом на период опытной эксплуатации пользователи также параллельно работали в исторических системах, что позволило получить данные для сравнения эффективности работы системы.

Ниже приведены результаты испытаний, полученные в разное время на разных предприятиях для которых реализовывались различные компоненты интеллектуальной системы управления в рамках единой концепции интеллектуальной системы. Выводы по главе подготовлены на основании анализа фактических данных, полученных в результате проведения всех видов испытаний системы.

6.2. Система календарного планирования производства

Рассмотрим результаты испытаний системы календарного планирования производства.

Сравнение допустимого плана производства с имеющимся на производстве

В качестве первого тестового примера был взят реальный месячный план производства (таблица 29) [240]. ГКПП выглядит следующим образом:

Таблица 29 План производства

КОД	Обозначение	Количество
91	СМ35	2
108	СМ315-01	8
53	ЗТМ220	2

После разузлования данных о структуре и технологии производства продукции были получены следующие данные:

1. Справочник номенклатуры состоит из 26 572 записей, т.е. $C=26\ 572$.

2. Справочник операций состоит из 109 521 записей, т.е. $E=109\ 521$.

3. План составляется на месяц с 22 рабочими днями и режимом работы в одну смену, т.е. $T = 22$.

4. Матрица имеет размерность 109 521 на 22, что определяет 2.409.462 независимых переменных в задаче.

Основным критерием для данной задачи был критерий скорости выполнения плана производства.

С помощью АСППО 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. На рисунке 88 изображена диаграмма выполнения технологических этапов за каждый рабочий день планового периода согласно найденному календарному плану производства. Если технологический этап длится более одного дня, то он учитывается несколько раз.



Рисунок 88 – Диаграмма выполнения технологических этапов по рабочим дням планового периода

В данном примере сравнение идет с фактическим выпуском продукции предприятием. Расчет проводился после регистрации выпуска продукции, поэтому построить графики распределения ТП по дням и график загрузки оборудования по факту не представляется возможным. Однако известно, что производство было закончено точно в срок, т.е. через 22 рабочих дня после начала производства. В результате работы АСППО удалось сократить время выполнения данного плана практически до 17 дней, что показывает неэффективность ручной системы планирования [241].

Полученные результаты были переданы группе экспертов предприятия для более детального изучения. По результатам изучения найденного календарного плана производства экспертами были даны следующие заключения:

1. Найденный календарный план производства является допустимым и выполнимым.

2. Использование найденного плана производства действительно позволило бы выпустить требуемый объем продукции за 18 рабочих дней.

Тестовый пример

В качестве тестового примера был взят ГКПП одной номенклатурной единицы – трубы бурильной утяжеленной – с достаточно простой технологией производства. План представлен в таблице 30. Технология изготовления данного изделия состояла из четырех технологических процессов, в каждом из которых было до 25 операций. Последняя отгрузка запланирована на 12-й день, таким образом, в расчет попадут только первые 12 дней. Итого получаем матрицу размером 25 на 12, итого 300 переменных.

Таблица 30 Тестовый пример

Номер дня	Кол-во
5	10
7	10
9	10
11	10
12	20

С помощью АСППО был найден план-график производства, позволяющий произвести необходимое количество продукции без нарушения сроков выполнения заказов. Так как отгрузка продукции была запланирована с перерывами в день, первоначально было найдено решение, которое позволит произвести всю необходимую продукцию, не создавая при этом даже промежуточных складских остатков. Для многих предприятий такой план производства будет предпочтительным, особенно для предприятий, стремящихся работать по методике just in time [242, 243]. Однако данный план имеет свои недостатки: неэффективное использование

рабочих мощностей, простои в производстве, низкая скорость выполнения плана, недостаточная комфортность производства.

Поэтому найденный допустимый план был оптимизирован с помощью алгоритма оптимизации плана производства. В таблице 31 представлены графики выполнения технологических процессов по дням. Цифры в ячейках указывают количество ТП данного вида, запланированных на данный день. При этом если ТП выполняется больше одного дня, то он будет учтен несколько раз. Отметим, что после оптимизации значительно повысилась степень комфортности производства и скорость выполнения плана.

Таблица 31 План выполнения технологических этапов

До оптимизации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
УБТС цех 1 пункт 4	0	0	0	0	10	0	10	0	10	0	10	20	0
УБТС цех 26 пункт 3	0	0	0	10	0	10	0	10	4	17	20	0	0
УБТС цех 2 пункт 2	0	0	10	0	10	0	10	10	16	13	0	0	0
УБТС цех 1 пункт 1	0	10	0	10	0	10	10	10	10	0	0	0	0
После оптимизации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
УБТС цех 1 пункт 4	0	0	0	10	10	10	10	10	10	0	0	0	0
УБТС цех 26 пункт 3	0	0	10	10	10	10	10	10	0	0	0	0	0
УБТС цех 2 пункт 2	0	15	20	25	30	20	10	0	0	0	0	0	0
УБТС цех 1 пункт 1	50	45	30	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0

На рисунке 89 изображена диаграмма загрузки оборудования, отображающая процент загрузки оборудования в каждый рабочий день планового периода. На диаграмме представлены данные плана производства до оптимизации и данные, полученные в результате оптимизации плана. Очевидно, что найденный план производства обеспечивает более качественную загрузку оборудования по сравнению с первоначальным планом, оставляя резерв мощностей в конце периода, и перенося основную нагрузку на начало периода.



Рисунок 90 – Диаграмма выполнения технологических этапов
по рабочим дням планового периода

Производство крупных партий строительных машин СМ-15

В качестве примера демонстрирующего возможности промышленного использования системы был взят близкий к реальному (соответствующий, по сути, тем планам производства, которые принимались ранее) производственный план предприятия ООО «Завод СДМ», г. Пермь (было взято базовое изделие СМ 15-01 без модификаций, но при этом сильно увеличен объем производства, чтобы убедиться в эффективности работы АСППО). Расчет проводился на три месяца. В реальности план производства, как правило, не бывает выполнен полностью в плановом периоде. Как правило, к началу периода уже есть определенный задел деталей и агрегатов, и по завершению месяца остается также незавершенное производство. Поэтому показательным является второй месяц, так как к началу второго месяца уже есть определенный задел деталей и к концу месяца также необходимо будет подготовить определенный набор деталей, чтобы производство не стартовало с нуля. Если бы на универсальном

производстве план стартовал с нуля (т.е. без задела с прошлого месяца), то это бы означало, что в начале месяца простаивали бы цеха финальной сборки изделия, а в конце месяца простаивали бы цеха подготовки деталей нижнего уровня. Данный пример показывает, как работает система в условиях реального производства. Обычно на предприятии выпускаются разные модификации изделий (в данном случае ограничились одной модификацией), но увеличили план выпуска, чтобы усложнить задачу планирования и распределения мощностей.

В данном примере приоритетным был выбран критерий комфортности производства. Также в качестве дополнительных требований стало снижение рисков невыполнения плана производства в срок. При этом установлено ограничение на досрочный выпуск деталей, агрегатов и изделий 10 рабочих дней. Это означает, что изделие не может быть выпущено раньше, чем за 10 дней до крайней даты, найденной при планировании с конца. Данное ограничение предотвращает замораживание оборотных средств предприятия. При этом ГКПП выглядит следующим образом:

Таблица 32 Пример производства крупных партий

Дата выпуска (день от начала планового периода)	Число изделий
22	50
44	50
66	50

После разузлования данных о структуре и технологии производства продукции были получены следующие оценки:

1. Справочник номенклатуры состоит из 6195 записей, т.е. $S=6195$.
2. Справочник операций состоит из 35117 записей, т.е. $L=35117$.

3. Последняя дата отгрузки готовой продукции T=66.

С помощью АСППО был найден план-график производства, позволяющий произвести необходимое количество продукции без нарушения сроков выполнения заказов (далее допустимый). Найденный допустимый план был оптимизирован с помощью алгоритма оптимизации плана производства.

На рисунке 91 представлены график выполнения технологических процессов по дням второго месяца производства. Точки на графике указывают среднее количество технологических процессов, запланированных на данный день. При этом если ТП выполняется больше одного дня, то он будет учтен несколько раз.

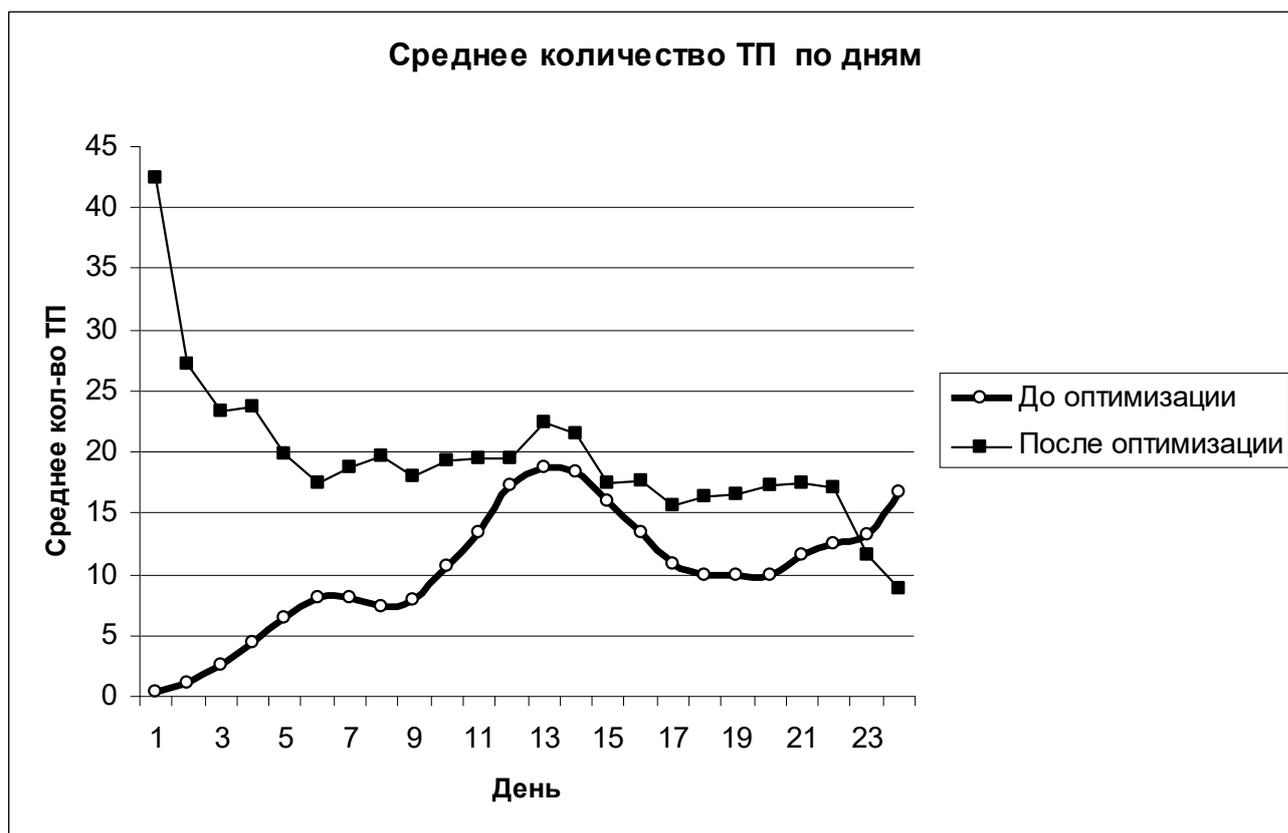


Рисунок 91 – Распределение технологических этапов

На рисунке 92 изображена диаграмма загрузки оборудования, отображающая процент загрузки оборудования в рабочие дни. На

диаграмме представлены расчетные данные до и после оптимизации допустимого плана производства.



Рисунок 92 – Средняя загрузка оборудования

На рисунке 93 представлены значения показателя комфортности K до и после оптимизации.

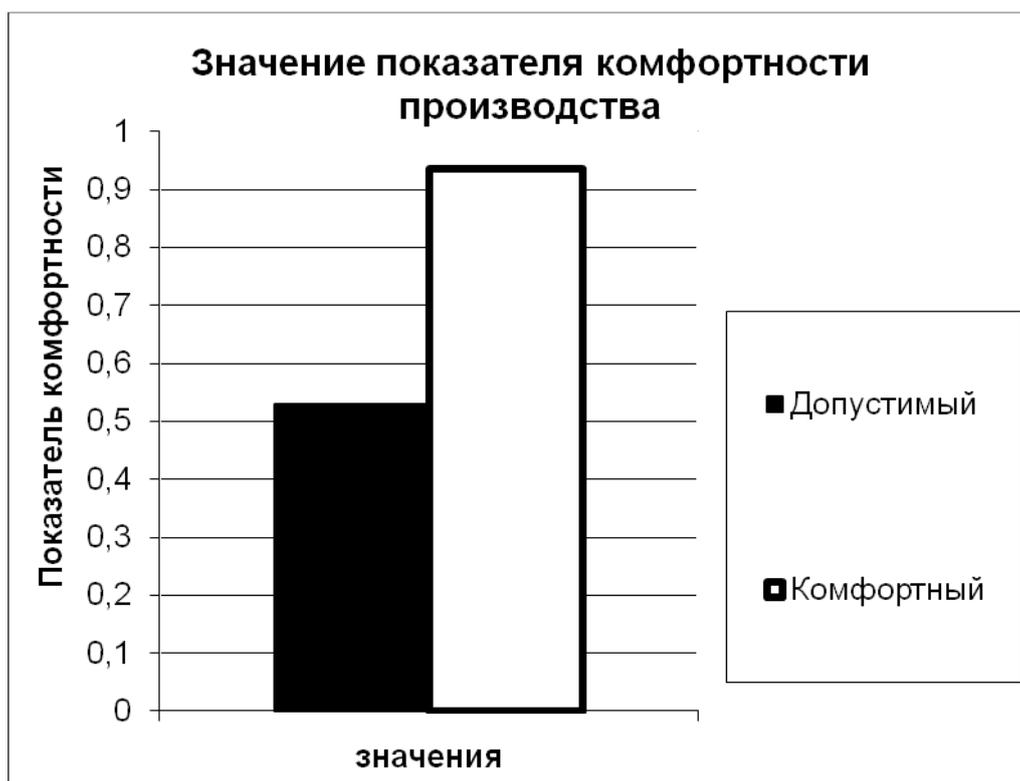


Рисунок 93 – Комфортность производства

Из приведенных графиков видно, что после оптимизации допустимого плана производства произошли следующие характерные изменения:

1. Основная нагрузка переместилась к началу периода, что позволяет снизить риски невыполнения плана производства.
2. За счет ограничения на досрочный выпуск деталей производственный график стал более равномерным.
3. В последние дни планового периода нагрузка снижается, что дает возможность оперативно решать возникающие проблемы.
4. Значение показателя комфортности увеличено на 70% по сравнению с допустимым планом производства.

Комплексный критерий оптимизации

Пусть в рамках предыдущей постановки определения оптимального плана производства изделий СМ 15-01 интерес представляет не только критерий комфортности производства, но и критерии равномерности

производства и снижение риска срыва плана производства. В приведенном примере рассматривается трехмесячное планирование, однако значения критериев вычисляются для второго месяца. Ввиду этого обстоятельства при оптимизации плана производства не будет учитываться критерий минимизации срока, так как общий срок производства будет более двух месяцев, что выходит за рамки оцениваемого периода. Тогда обобщенный критерий оптимизации будет записан при $n=3$. При этом экспертные оценки важности критериев следующие: $\mu_1 = 0,7$, $\mu_2 = 1$, а $\mu_3 = 0,3$. Остается ограничение на досрочный выпуск деталей, агрегатов и изделий (10 рабочих дней). ГКПП остается без изменений.

В качестве допустимого плана производства был использован, допустимый план (допустимый). Найденный допустимый план был оптимизирован с помощью алгоритма оптимизации плана производства, с использованием комплексного критерия оптимальности.

На рисунке 94 представлен график изменения показателя равномерности плана производства ρ_d для трех планов производства: допустимый план до оптимизации (допустимый), план после оптимизации по критерию комфортности (далее комфортный) производства, план после оптимизации по комплексному критерию с экспертными оценками (далее экспертный). Точки на графике указывают значение показателя ρ_d между днями d и $d+1$.



Рисунок 94 – Равномерность загрузки оборудования

На рисунке 95 представлены значения показателя минимальности риска срыва производства ϕ для допустимого, комфортного и экспертного производственных планов.

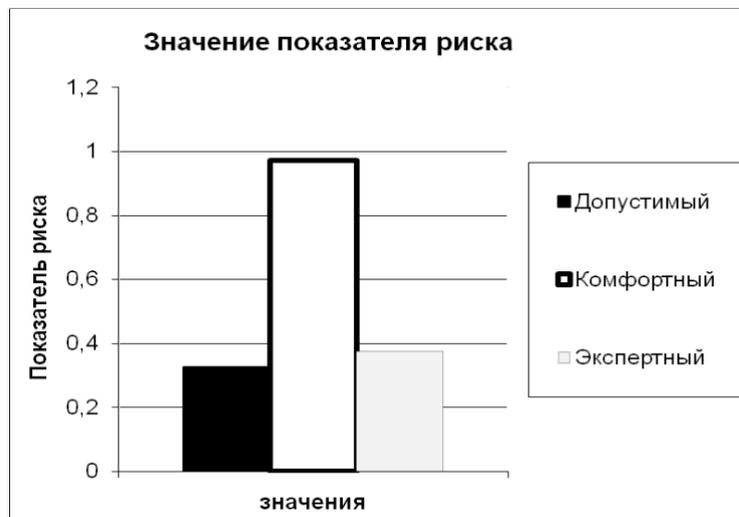


Рисунок 95 – Риск срыва производства

На рисунке 96 представлены значения показателя комфортности K для допустимого, комфортного и экспертного производственных планов.

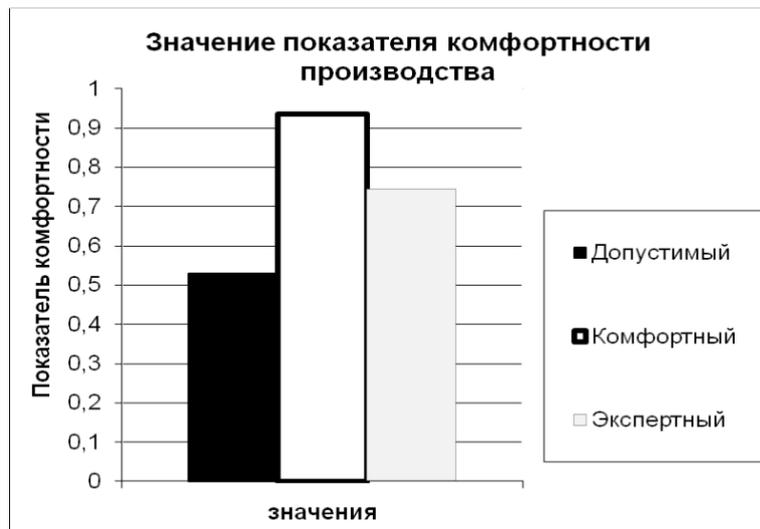


Рисунок 96 – Комфортность производства

Из приведенных графиков видно, что после оптимизации допустимого плана производства по комплексному критерию произошли следующие характерные изменения:

1. Значение показателя комфортности улучшено по сравнению с допустимым планом, и меньше оптимального значения (комфортный план) менее чем на 20%.
2. Показатель равномерности загрузки оборудования улучшен практически в два с половиной раза по отношению к допустимому и комфортному плану производства.
3. Основная нагрузка распределилась по всему периоду, что не позволило снизить риски невыполнения плана производства, таким образом, значения показателя риска ухудшено практически в три раза по отношению к комфортному плану производства.

В вышеприведенном примере использовались значения функции принадлежности, установленные с помощью экспертной оценки, т.е. те значения, которые наиболее соответствуют представлению экспертов о приоритетах построения производственного процесса. Найдем значения функций принадлежности как результат решения оптимизационной задачи. Еще раз отметим, что в примере рассматривается трехмесячное

планирование производства, причем значения критериев вычисляются для второго месяца. Ввиду этого обстоятельства при исследовании не будет учитываться критерий минимизации срока производства, так как общий срок производства будет более двух месяцев, что выходит за рамки оцениваемого периода.

Оптимизации плана производства при заданном значении функции принадлежности требуется ориентировочно пять минут машинного времени. Для исследования были выбраны значения функции принадлежности от 0,1 до 1 с шагом в 0,1. Таким образом, для исследования значений трех критериев необходимо провести тысячу экспериментов, которые займут около 5 дней. Поэтому предлагается провести сужение множества решений для получения одного или нескольких решений, наиболее удовлетворяющих требованиям экспертов.

Для сравнения решений в исследуемой задаче оптимизации использовался индекс ранжирования.

Необходимо учитывать, что при одинаковых значениях частных критериев $J_i^{r1} = J_i^{r2}$ большим будет признано то значение обобщенного критерия, у которого больше значения функции принадлежности. Данное обстоятельство объясняется тем, что значения функции принадлежности отражают важность критериев.

В результате проведенных вычислений было получено множество решений (размер множества совпадает с количеством проведенных вычислений). Из данного множества были исключены решения, заведомо не оптимальные. Заведомо неоптимальными решениями были признаны значения J^{r1} , для которых существует решение J^{r2} , такое, что для всех i выполняются условия: $J_i^{r1} \leq J_i^{r2}; \mu_i^{r1} \leq \mu_i^{r2}$. Таким образом, получили набор решений (множество выбираемых решений), представленный в таблица 33.

Используя индекс ранжирования, были получены оптимальные оценки важности частных критериев для данной задачи: $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = 0,6$, $\mu_3 = 0,8$.

Отметим, что решение с экспертной оценкой функции принадлежности (предыдущий пример) не попало в число наилучших. Однако при постоянной эксплуатации системы, оценки, полученные из практического опыта для конкретного производства, вероятно, будут давать вполне удовлетворительный результат.

Таблица 33 Множество выбираемых решений задачи

№	μ_1	μ_2	μ_3	J_1	J_2	J_3	Ранг
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	

Комплексный критерий оптимизации при наилучших значениях функций принадлежности

Рассмотрим решение задачи при наилучших значениях функций принадлежности: $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = 0,6$ а $\mu_3 = 0,8$. Отметим, что остается

ограничение на досрочный выпуск деталей, агрегатов и изделий (10 рабочих дней) и ГКПП остается без изменений (Таблица 33).

В качестве допустимого плана производства был использован, допустимый план, найденный выше (допустимый). Найденный допустимый план был оптимизирован с помощью алгоритма оптимизации плана производства, с использованием комплексного критерия оптимальности.

На рисунке 97 представлен график изменения показателя равномерности плана производства ρ_d для четырех планов производства: допустимый план до оптимизации (допустимый), план после оптимизации по критерию комфортности (комфортный), план после оптимизации по комплексному критерию с экспертными оценками (экспертный) и план после оптимизации по комплексному критерию с наилучшими оценками важности критериев (далее оптимальный). Точки на графике указывают значение показателя ρ_d между днями d и $d+1$.

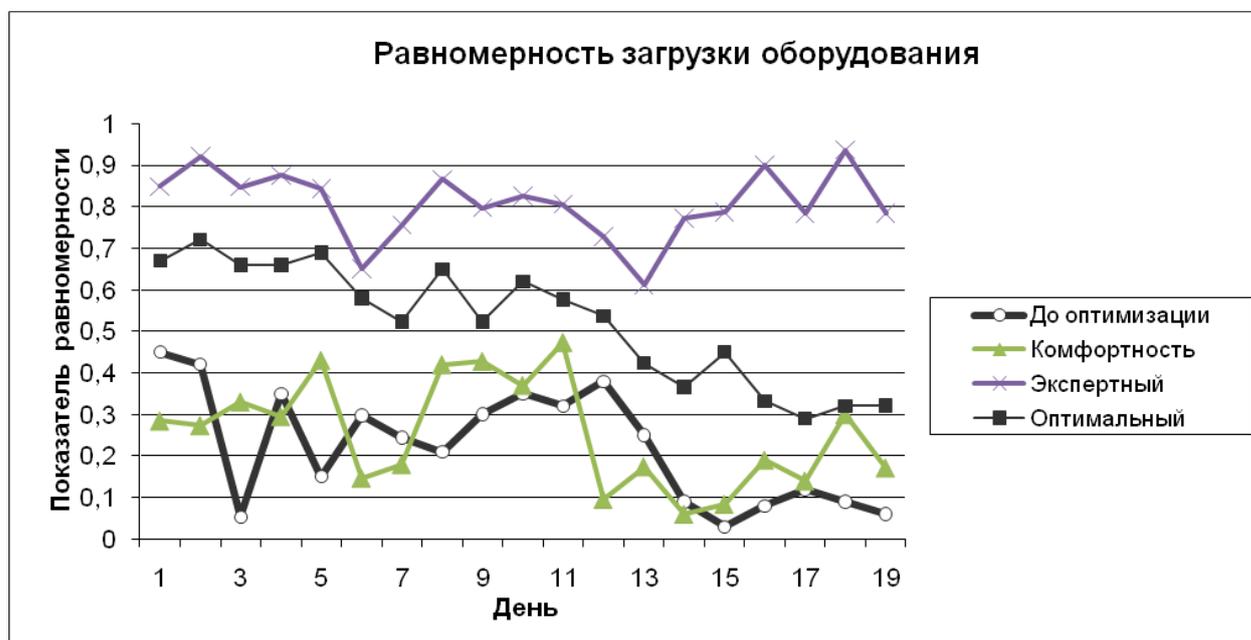


Рисунок 97 – Равномерность загрузки оборудования

На рисунке 98 представлены значения показателя минимальности риска срыва производства ϕ для допустимого, комфортного, экспертного и оптимального производственных планов.

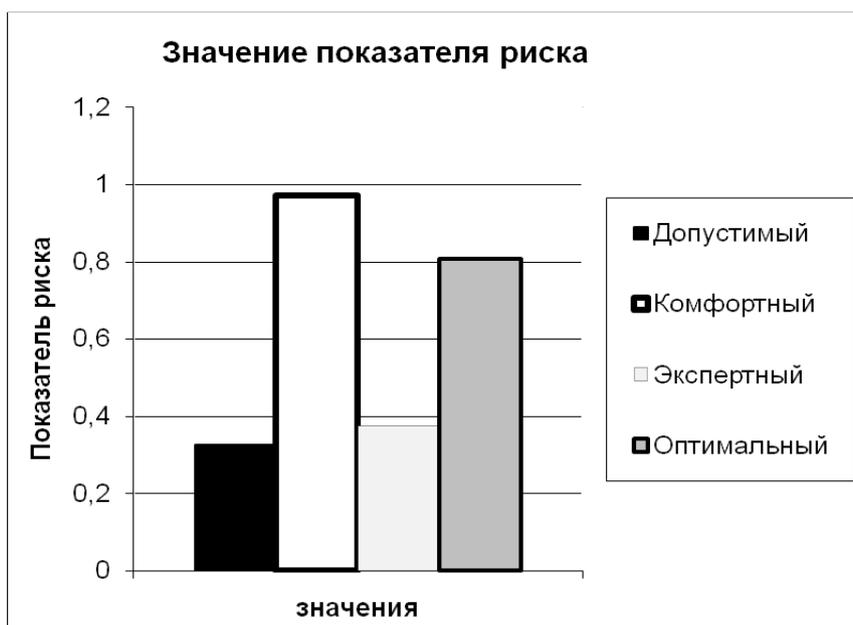


Рисунок 98 – Риск срыва производства

На рисунке 99 представлены значения показателя комфортности K для допустимого, комфортного и комплексного производственных планов.

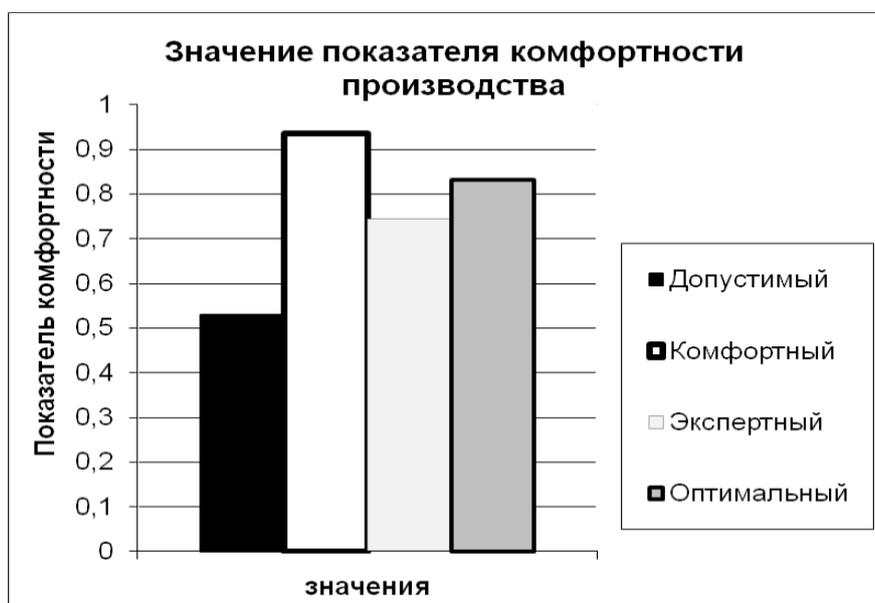


Рисунок 99 – Комфортность производства

Из приведенных графиков видно, что после оптимизации допустимого плана производства по комплексному критерию произошли следующие характерные изменения:

1. Значение показателя комфортности улучшено по сравнению с допустимым планом, и меньше оптимального значения (комфортный план) менее чем на 10%.

2. Показатель равномерности загрузки оборудования значительно улучшен по отношению к допустимому и комфортному плану производства, однако на 40% меньше, чем в экспертном плане производства.

3. Значение показателя риска срыва производства в два с половиной раза лучше, чем в допустимом плане, и менее чем на 20% меньше оптимального значения;

4. За счет ограничения на досрочный выпуск деталей производственный график стал более равномерным.

5. В последние дни планового периода нагрузка снижается, чтобы дать возможность оперативно решить возможные проблемы.

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, таким образом, реализуется обобщенный критерий оптимальности в нечеткой постановке.

4. Дополнительная возможность снижения рисков невыполнения плана позволяет использовать найденные системой производственные планы без корректировок и поправок на неточность данных.

По результатам успешного проведения предварительных испытаний была проведена также опытная эксплуатация системы. Длительность опытной эксплуатации составила 3 месяца, что было полностью достаточно для полноценной проверки системы в условиях реального производства.

Планы производства, рассчитанные системой планирования, допускалось редактировать на уровне службы планирования, все корректировки планов производства фиксировались в журнале опытной эксплуатации с комментариями о причинах корректировки. Кроме того, для получения возможности работы с отклонениями график выпуска готовых изделий был скорректирован на 7 календарных дней влево, чтобы создать оперативный запас времени на устранение возможных срывов сроков сдачи готовой продукции.

На период опытной эксплуатации рассчитанные системой планы производства формально являлись обязательными к исполнению, но начальники цехов имели возможность исполнять план производства исходя из реальных производственных условий, что негативно сказалось на качестве опытной эксплуатации, так как изменение порядка производства в одном цехе также влияет на смежные подразделения, что увеличивает отклонения от плана по цепочке. На протяжении всего периода опытной эксплуатации команда проекта коммуницировала с руководством подразделений, допустивших отклонения от плана, с целью выявления реальных причин отклонений. По оценке команды проекта, лишь 25% отклонений имели реальное обоснование, а остальные 75% были связаны с субъективными оценками реальной потребности.

Результаты проведения опытной эксплуатации приведены в таблице 34.

Таблица 34. Результаты опытной эксплуатации

№	Показатель	Месяц 1	Месяц 2	Месяц 3
1	Комфортность плана	79%	83%	81%
2	Равномерность	91%	86%	92%

3	Количество отклонений (% не выполнения точно в срок от общего, без учета опережений)	37%	24%	9%
4	Средний процент выполнения плана выпуска до начала эксплуатации	87%		
5	Выполнение плана выпуска в срок	79%	83%	100%
6	Динамика незавершенного производства по отношению к среднему значению, руб. («-» снижение, «+» увеличение)	+4%	+1%	-3%
7	Средний процент выработки рабочих до начала эксплуатации	106%		
8	Средняя выработка рабочих	105%	104%	105%

Все три месяца опытной эксплуатации предприятие работало с высокой загрузкой, характерной для производства длительный период времени. План выпуска изделий по году достаточно равномерный, без сезонных колебаний и прочих аномалий. Таким образом влияние внешних факторов на результаты работы с системой минимально, полученные результаты можно объяснить только организационными изменениями, связанными с новой системой планирования производства.

Первый месяц эксплуатации был отмечен ухудшением основных показателей деятельности предприятия, увеличением уровня незавершенного производства и низким процентом выполнения плана выпуска изделий. Частично это можно объяснить искусственным сдвигом влево дат выпуска изделий, но по результатам анализа отклонений, автор считает, что реальная причина ухудшения параметров производства связана с непривычностью и недоверием к системе. Анализ отклонений в выполнении плана производства показал, что реальные причины выполнять вместо рассчитанного плана производства операции с другими партиями

деталей отсутствовали. На предприятии до начала использования системы планирования уровень незавершенного производства был достаточно высоким, что позволяло начальнику цеха самому решать какие детали обрабатывать для обеспечения высоких показателей выработки рабочих. В результате сложилась системная для многих предприятий картина, когда план выпуска системно не выполняется, уровень незавершенного производства постоянно растет, а выработка рабочих системно выше 100%.

Системная работа с анализом причин отклонений и принятие дисциплинарных мер к руководителям цехов и участков позволила уже на третий месяц использования системы добиться 100% выполнения плана выпуска изделий даже существенно сократить уровень незавершенного производства при сохранении общего уровня выработки рабочих.

Полученные результаты убедили руководство предприятия принять систему в промышленную эксплуатацию. Дальнейший анализ работы системы проводился менее детально, только по ключевым показателям. Через девять месяцев работы системы был достигнут стабильный процент выполнения плана выпуска точно в срок – 100%, а уровень незавершенного производства сократился на 28%, по отношению к дате начала эксплуатации.

6.3. Подсистема синхронизации производства, встраиваемая в ERP

При реализации подсистемы синхронизации производства была выбрана микросервисная архитектура решения. На рисунке 100 представлена схема автоматизации подсистемы. 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 [244]. 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 100 – Схема автоматизации Системы

Испытания системы проводились на предприятии «Авиационные редуктора и трансмиссии – Пермские моторы» (сокращенное название «Редуктор-ПМ») созданной на основе отдельного редукторного производства пермского моторостроительного холдинга «Пермские моторы» в 1995 году. «Редуктор-ПМ» – одно из крупнейших в России предприятий, специализирующихся на производстве и послепродажном обслуживании вертолетных редукторов и трансмиссий. Предприятие выпускает, ремонтирует и обслуживает главные редукторы и агрегаты трансмиссий вертолетов серии Ми-8/17, Ми-26(Т), Ансат, Ми-38. Кроме того, «Редуктор-ПМ» активно участвует в проектах модернизации вертолетов типа Ми-8/17 и Ми-26(Т). Холдинг «Вертолеты России» создал на базе «Редуктор-ПМ» центр компетенций по разработке и производству вертолетных агрегатов и испытательных стендов. Предприятие

спроектировало, построило и сертифицировало уникальные стенды для испытаний трансмиссии. Завершена установка стенда для испытаний главных редукторов ВР-8А и ВР-14. На всех стендах реализована эффективная механически-замкнутая кинематическая схема, установлены современные измерительные и управляющие компоненты, создана специальная автоматизированная система управления. На момент начала испытаний на предприятии уже была внедрена система календарного планирования производства, которая позволяла в целом успешно планировать производство, планировать потребности в материалах, покупных комплектующих и деталях собственного производства. Несмотря на это уровень незавершенного производства оставался стабильно высоким, а на сборочном производстве регулярно возникал дефицит комплектующих, что снижало ритмичность сборки и приводило к необходимости решения проблем в авральном режиме. Ввиду того, что производство авиационной техники является максимально ответственным, большое количество деталей редуктора являются номерными, что требует единичной детализации партий деталей. В результате одновременно в производстве находятся сотни и тысячи партий, требующих индивидуального контроля и диспетчирования.

Каноническим подходом при реализации систем управления производства следует считать снижение всех видов потерь, повышении эффективности использования ресурсов предприятия при 100%-м выполнении планов выпуска и отгрузки готовой продукции. При этом отдельный акцент делается на минимизацию незавершенного производства и запасов по всей цепочке создания ценности [245].

Особняком здесь стоят так называемые «страховые запасы», понятие приведено в кавычках ввиду того, что обычная практика создания страховых запасов в цепочке создания ценности приводит как раз к затовариванию складов невостребованными материалами и

комплектующими при существенном увеличении уровня незавершенного производства и, как ни странно, снижению процента выполнения планов производства при полной загрузке производства. В работах по бережливому и быстро реагирующему производству [246] наглядно показано, как создание излишних запасов губительно сказывается на основных показателях эффективности производства. Дело в том, что излишние запасы и незавершенное производство делают производственную систему выталкивающей. Каждый участок и цех имеет возможность самостоятельно выбирать какую продукцию производить в каждый момент вместо того, чтобы строго выполнять план производства. Аргументы для невыполнения плана производства существуют самые разнообразные, начиная с технологической целесообразности до необходимости равномерной загрузки производства и минимизации потерь, связанных с переналадкой оборудования и т.д. В результате все усилия, которые предпринимаются руководством для построения системы планирования умножаются на ноль. По мнению автора вопрос страховых запасов должен быть максимально исследован на этапе подготовки к внедрению систем управления производством. Необходимо системно оценить, где и какие страховые запасы должны создаваться и дать детальное обоснование каждой необходимости создания страховых запасов.

После этого все потребности в страховых запасах следует разделить на четыре категории:

1. Страховые запасы покупных материалов и комплектующих, необходимые для минимизации рисков срыва поставок от поставщиков и других внешних факторов, способных повлиять на цепочку поставки покупки материалов.
2. Страховые запасы готовой продукции и готовых компонентов для быстрого выполнения незапланированных заказов. Обоснование создания таких запасов должно быть выполнено максимально

тщательно, так как такие запасы замораживают существенные оборотные средства на складах. Такие запасы должны быть обоснованы либо прямой необходимостью (например если заказчик явным образом включает в контракты требования по поддержанию таких запасов) либо экономической целесообразностью (например, в случае, если экстренные заказы позволяют отгрузить продукцию по существенно более высокой цене, что покроет все затраты на создание страховых запасов и принесёт предприятию дополнительную прибыль). Еще раз следует отметить, что обоснование должно быть выполнено максимально тщательно с учетом рисков и вероятностей.

3. Страховые запасы, необходимые для обеспечения бесперебойной работы узких мест в производстве. Один из самых сложных видов запасов, которые сложно обосновать и контролировать. Работа с выявлением и «расшивкой» узких мест должна быть организована в соответствии с требованиями теории ограничений, необходимость поддержания таких запасов должна регулярно проверяться. В случае, если «узкое место» перестало ограничивать производство, следует немедленно сократить страховой запас.
4. Прочие страховые запасы, предназначенные для обеспечения бесперебойной работы производства в случае, если смежные подразделения не поставят нужное количество материалов и полуфабрикатов в установленные сроки. В эту же категорию относятся запасы, связанные с возможным возникновением брака в производстве. По мнению автора данный вид запасов должен быть минимизирован настолько, насколько возможно при внедрении системы управления производством. Простои производства на периоде стабилизации системы управления неизбежны, как и неизбежны остановки конвейера на Тойота, однако только

направленная работа с выстраиванием материальных потоков в производстве даст реальные результаты и эффективность. Автору неизвестно ни одно предприятие, где данный тезис был принят без сопротивления, однако автору неизвестно также ни одно предприятие, которое бы достигло существенных результатов в построении системы управления производством, которое бы в итоге не приняло данный подход.

Каким бы в итоге ни был состав страховых запасов использование данного вида запасов должно быть строго ограничено. Запасы в обязательном порядке должны быть изолированы от производства, физически. Выдача товарно-материальных ценностей (ТМЦ) может быть выполнена только в одном из двух случаев:

1. План производства содержит потребность в запрашиваемом количестве ТМЦ (выдача под план) и данные ТМЦ не были получены ранее (лимитно-заборная карта).
2. ТМЦ получают повторно, ввиду зафиксированного брака. В данном случае должно быть предоставлено подтверждение факта передачи партии ДСЕ с отклонениями в изолятор брака (брак должен быть изолирован также физически).

При внедрении системы синхронизации производства в Редуктор-ПМ были выполнены все рекомендации по управлению запасами, в результате были сформированы два вида страховых запасов:

1. Страховые запасы покупных материалов и комплектующих, необходимые для минимизации рисков срыва поставок от поставщиков Данный вид запасов фактически никак не влияет на систему управления производством ввиду невозможности получения производством лишних ТМЦ сверх запланированного количества.

2. Страховые готовых компонентов для быстрого выполнения незапланированных заказов. Создание данного вида запасов было обосновано регулярным поступлением экстренных заказов от головной организации и наличием непрогнозируемой потребности в комплектующих при выполнении ремонтов изделий (сервис). Кроме того, данные запасы в том числе страховали возможные проблемы сборочного производства, связанные с поздним выявлением бракованных комплектующих. Склад готовых деталей был полностью изолирован от производства, детали и комплектующие выдавались на сборку комплектами, таким образом у сборочного цеха не было возможности выполнять производство чего-либо, кроме запланированных заказов. Заказы на пополнение страховых запасов деталей планировались в общем потоке, с пониженным приоритетом, чтобы не блокировать производство деталей, производимых под заказы клиентов.

При внедрении системы синхронизации производства руководством были поставлены цели снижения всех видов запасов в производстве и уровня незавершенного производства при 100%-м выполнении плана производства (включая заказы на пополнение страховых запасов деталей).

Для успешного внедрения Системы была необходима организационная поддержка на всех уровнях управления. Следовало обеспечить строгое выполнение рекомендации системы, увязать систему с действующей оплатой труда таким образом, чтобы нарушение рекомендаций системы влекло за собой снижения реального уровня оплаты труда ответственных сотрудников и наоборот, в комплексе с системой ограничения выдачи ТМЦ со складов.

Кроме того, руководству также было рекомендовано дополнительное внесение изменений в учетные процедуры: работники ОТК, бухгалтерия и логистические службы не должны иметь возможность принимать

документы и осуществлять контроль партий деталей, работа по которым не была активирована Системой.

Испытания подсистемы синхронизации проводились в последовательности, описанной в разделе 6.1. При проведении предварительных испытаний особо тщательно тестировались не только сами алгоритмы синхронизации производства, но и механизмы интеграции. Было проведено полноценное нагрузочное тестирование, с увеличенным в пять раз количеством операций в системе, по отношению к обычному режиму работы. Важно было обеспечить возможность масштабирования системы в будущем.

В итоге проведение предварительных испытаний заняло полтора месяца, были выявлены и устранены замечания, которые не позволяли обеспечить требуемый уровень производительности системы. В результате чего комиссия единогласно приняла решение о возможности проведения опытной эксплуатации системы.

По результатам успешного проведения предварительных испытаний была проведена также опытная эксплуатация системы. Длительность опытной эксплуатации составила 3 месяца, что было полностью достаточно для полноценной проверки системы в условиях реального производства.

Результаты проведения опытной эксплуатации приведены в таблице 35.

Таблица 35. Результаты опытной эксплуатации

№	Показатель	Месяц 1	Месяц 2	Месяц 3
1	Процент невыполнения рекомендаций системы (учитывались и производство без активации и невыполнение активированных партий)	26%	9%	10%
2	Средний процент выполнения плана выпуска до начала эксплуатации	96%		

3	Выполнение плана выпуска в срок	92%	97%	99%
4	Динамика незавершенного производства по отношению к среднему значению, руб. («-» снижение, «+» увеличение)	-3%	-4%	-6%
5	Средний процент выработки рабочих до начала эксплуатации	98%		
6	Средняя выработка рабочих	91%	92%	91%

Все три месяца опытной эксплуатации предприятие работало с высокой загрузкой, характерной для производства длительный период времени. В течение опытной эксплуатации план выпуска готовых изделий был изменен четыре раза, что на втором месяце эксплуатации потребовало пересчета плана производства в середине месяца, поэтому результаты второго месяца эксплуатации нельзя считать в полной мере показательными, так как результаты были усреднены.

В процессе опытной эксплуатации не было зафиксировано существенных ухудшений основных показателей деятельности предприятия. Средняя выработка рабочих снизилась, но данный результат был ожидаем, так как предприятие перешло к вытягивающей схеме управления. При этом всем рабочим был сохранен прежний уровень оплаты труда, что являлось важнейшим условием, сформулированным до начала эксплуатации. В результате руководство предприятия получило объективную картину загрузки производства и информацию о наличии резервов. В результате опытной эксплуатации системы стал очевиден тренд на снижение уровня незавершенного производства и повышению общей управляемости производством.

Полученные результаты убедили руководство предприятия принять систему в промышленную эксплуатацию. Дальнейший анализ работы системы проводился менее детально, только по ключевым показателям.

Через 11 месяцев работы системы был достигнут стабильный процент выполнения плана выпуска точно в срок – 98%, а уровень незавершенного производства сократился на 36%, по отношению к дате начала эксплуатации. За этот период количество совещаний по работе с «дефицитами» сократилось более чем в десять раз, начальники цехов и мастера участков стали активными сторонниками использования системы, так как процесс производства стал значительно более прозрачным и предсказуемым. Практически до нуля снизились авралы и затраты, связанные с переналадкой оборудования для обработки «аварийных» партий.

Практическая реализация синхронизированной системы управления мелкосерийным производством позволила значительно повысить эффективность производства, радикально снизить уровень незавершенного производства, цикл производства продукции, затраты на производство [245]. Дополнительно это привело к значительному повышению прозрачности производства, качества планирования, актуальности данных в системе и повышению организационной управляемости производства [244].

6.4. Развитие встроенного MES для интеллектуального управления внутри цеха

При реализации подсистемы управления производством на оперативном уровне была выбрана технология встраивания решения в 1С:ERP с использованием расширений технологической платформы 1С Предприятие. Расширения конфигурации позволяют значительно упростить адаптацию типового прикладного решения к потребностям конкретного внедрения, конкретного заказчика. Стратегия, предлагаемая расширениями, заключается в том, что изменять типовую 1С:ERP не нужно. Все изменения выполняются в расширении, которое является отдельной конфигурацией. После этого пользователь самостоятельно подключает расширение к типовой конфигурации. Платформа автоматически, в режиме

1С:Предприятие, объединяет расширение с типовой конфигурацией 1С:ERP. Когда поставщик выпускает новую версию типовой конфигурации 1С:ERP, выполняется её автоматическое обновление, поскольку режим поддержки типовой конфигурации не меняется. Она осталась на полной поддержке поставщика. А при запуске обновлённого прикладного решения платформа снова автоматически объединит изменённую типовую конфигурацию с расширением.

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 [247]. В системе фиксируется запуск всех партий детали-сборочных единиц. Каждая партия получает свой уникальный идентификатор (номер) и сопроводительный документ со штрих-кодом (рисунок 101).

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 №					
№	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 101 – Пример листа сопровождения партии

Также для каждой партии определен перечень технологических операций, для каждой из которых, кроме времени выполнения, также

определен перечень дополнительных реквизитов, указывающих на вид обработки, профессию, разряд рабочего и т.д. (рисунок 102).

The screenshot displays two windows from a software application. The left window, titled '0010-0450/045 Мехобработка, сборка, комплектование (33582) (Маршрут...', shows a table of operations. The right window, titled '0160 Расточная с ЧПУ (Операция)', shows detailed parameters for a specific operation.

N	Операция	Вид работ	Количество	Ед. изм.
1	0010 Комплектование	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	2,099	мин
2	0020 Приготовление грунтовок	МАЛЯР, ЗАНЯТЫЙ НА РАБОТАХ ...	20,000	мин
3	0030 Слесарная	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	13,984	мин
4	0040 ИОТ-212 Контроль по операции	КОНТРОЛЕР СТАНОЧНЫХ И СЛЕ...	2,576	мин
5	0050 Сверлильная	СВЕРЛОВЩИК 4 разряд (94)	21,850	мин
6	0060 Слесарная	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	30,590	мин
7	0070 Приготовление эпоксидной компо...	МАЛЯР, ЗАНЯТЫЙ НА РАБОТАХ ...	20,000	мин
8	0080 Слесарная	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	32,471	мин
9	0090 ИОТ-212 Контроль по операции	КОНТРОЛЕР СТАНОЧНЫХ И СЛЕ...	4,416	мин
10	0100 Притирочная	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	16,041	мин
11	0110 ИОТ-64 Транспортирование	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	0,088	мин
12	0120 Промывка в растворе П-5	МАШИНИСТ МОЕЧНЫХ МАШИН Э...	0,768	мин
13	0130 ИОТ-64 Транспортирование	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	0,088	мин
14	0140 Фрезерная	ФРЕЗЕРОВЩИК 4 разряд (94)	17,460	мин
15	0150 Расточная	ТОКАРЬ-РАСТОЧНИК 6 разряд (94)	52,440	мин
16	0160 Расточная с ЧПУ	ОПЕРАТОР СТАНКОВ С ПРОГРА...	26,220	мин
17	0170 Расточная с ЧПУ	ОПЕРАТОР СТАНКОВ С ПРОГРА...	52,440	мин
18	0180 Расточная	ТОКАРЬ-РАСТОЧНИК 6 разряд (94)	52,248	мин
19	0190 Притирочная	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	16,271	мин
20	0200 Притирочная	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	18,061	мин
21	0210 ИОТ-64 Транспортирование	СЛЕСАРЬ МЕХАНОБОРОЧНЫХ ...	0,088	мин
22	0220 Промывка в растворе П-5	МАШИНИСТ МОЕЧНЫХ МАШИН Э...	0,768	мин

The right window shows details for operation 0160:

- Входит в маршрут: 0010-0450/045 Мехобработка, сборка, комплектование [33...
- N операции: 16; N след. опер.: 17
- Изготовить (выполнить): 0160 Расточная с ЧПУ
- Рабочий центр: []
- Номер технологической операции: 0160
- Код участка: 90
- Участок: 045-07
- Дата загрузки: 25.10.2018 1:14:48
- Коэффициент увеличения: 0,000
- Коэффициент уменьшения: 0,000
- Код профессии: 5930
- Наименование профессии: ОПЕРАТОР СТАНКОВ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕН
- Коефф. доплат за ТОН: 0,000
- Разряд: 5
- Тарифная сетка: 94
- Платежная расценка: 4 185,150
- Признак замены: []
- Признак замены оп.: []
- Примечание: []
- Дата изменения ВНИР: 18.12.2007 0:00:00

Рисунок 102 – Пример заполнения перечня технологических операций

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

Задача выполняется в фоновом режиме для всех этапов производства, по которым происходят изменения. Значение обновляется не реже одного раза в день. На рисунке 103 представлен доработанный интерфейс работы информационной системы.

обслуживании.

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.

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 104).

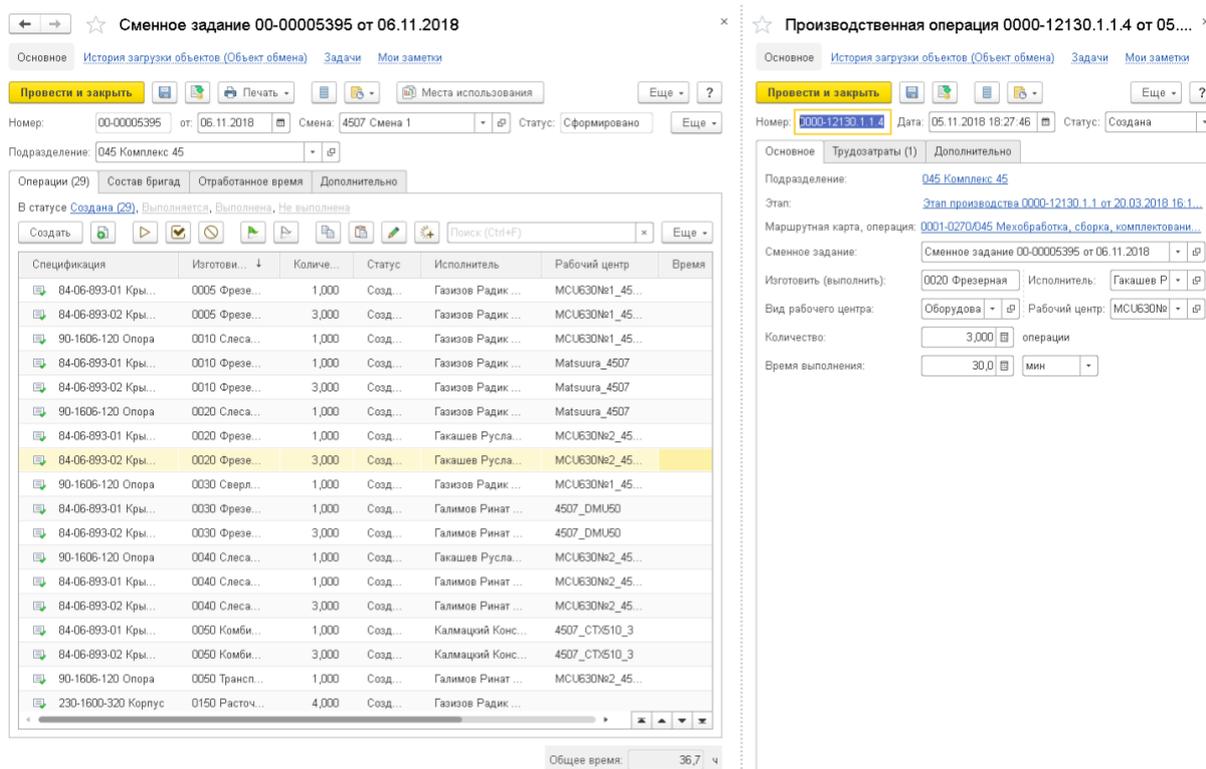


Рисунок 104 – Сформированное сменное задание

Для каждой операции в сменном задании выбран исполнитель и назначена конкретная единица оборудования, на которой данная операция должна быть выполнена. Мастер участка имеет возможность внести изменения в сменное задание, что также будет учтено при следующем формировании сменных заданий в автоматическом режиме. При должном оборудовании участков, система имеет возможность передать сменные задания прямо на станок с установленным терминалом, что позволяет оптимизировать процесс управления на участке, а также позволяет собирать со станков информацию о фактическом времени выполнения задания, количестве остановок и т.д. 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.

Кроме того, были проанализированы все сменные задания, сформированные вручную на начальном периоде эксплуатации по обобщенному критерию оптимальности $J^r = \{\mu_1/J_1; \mu_2/J_2; \mu_3/J_3\}$ со значениями экспертных оценок $\mu_1 = 1$ (срочность), $\mu_2 = 0,1$ (риски), $\mu_3 = 0,7$ (специализация). В результате анализа выяснилось, что только 5% сменных заданий, сформированных вручную, предпочтительнее автоматически сгенерированных сменными заданиями с самыми низкими значениями обобщенного критерия.

Кроме того, были осуществлены сравнения результатов автоматического планирования с полным перебором вариантов формирования сменных заданий на тестовых данных (3 исполнителя, 3 рабочих центра, 20 операций) и каждый раз результаты расчетов совпадали и были достаточно очевидны. Осуществить полный перебор вариантов на реальных данных производства не представляется возможным ввиду высокой размерности вариантов перебора.

Представленная постановка задачи построения интеллектуальной системы формирования и учета выполнения сменных заданий не является единственно возможной для конкретного предприятия. В будущем может потребоваться модификация задачи с учетом специфики производства. Сотрудник, ответственный за формирование сменных заданий, всегда может внести корректировки в автоматически сформированные задания, которые в дальнейшем будут также учтены при последующей работе системы в качестве новых знаний.

Испытания подсистемы оперативного управления производством проводились в последовательности, описанной в разделе 6.1. По результатам успешного проведения предварительных испытаний была проведена опытная эксплуатация системы. Длительность опытной

эксплуатации составила 3 месяца, что было полностью достаточно для полноценной проверки системы в условиях реального производства.

Результаты проведения опытной эксплуатации приведены в таблице 36.

Таблица 36. Результаты опытной эксплуатации

№	Показатель	Месяц 1	Месяц 2	Месяц 3
1	Количество ручных корректировок сменных заданий	28%	19%	10%
2	Средний процент выполнения плана выпуска до начала эксплуатации	87%		
3	% выполнения сменных заданий	79%	86%	92%
4	Средний % деталей с выявленными отклонениями до начала эксплуатации	0,9%		
5	% деталей с выявленными отклонениями	0,8%	0,9%	0,6%

По результатам трех месяцев опытной эксплуатации удалось перейти к почти полностью автоматическому формированию сменных заданий, снизить трудозатраты на формирование сменных заданий, повысить качество планирования, увеличить скорость реакции на изменения в производстве и снизить количество возникающих отклонений за счет использования специализации исполнителей и оборудования. В процессе опытной эксплуатации была также отмечена тенденция к снижению брака в производстве. Прямо корреляции с использованием системы установить невозможно, поэтому данная информация не была включена в отчет о результатах внедрения системы. По итогу проведения опытной эксплуатации руководством было принято решение о переводе системы в промышленную эксплуатацию.

Выводы по главе

В результате выполнения комплекса мероприятий по испытанию интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством получены результаты, которые позволяют утверждать, что использование интеллектуальной системы управления производством позволяет значительно повысить эффективность производства, в том числе:

1. Повысить процент выполнения плана выпуска изделий «точно в срок» до 98%;
2. Снизить уровень незавершенного производства на 37%;
3. Сократить число ошибок при планировании производства на 70%;
4. Снизить операционную нагрузку на сотрудников, осуществляющих планирование и диспетчирование производства на 70%;
5. Увеличить равномерность производства, снизить количество внеплановых работ и переработок сотрудников на 36%;
6. Определять нарушения производственного процесса и предотвращать возможные проблемы, что позволяет увеличить качество продукции и уменьшить затраты на работу с несоответствующей продукцией на 7%.

Таким образом, внедрение интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством положительно влияет на развитии производства, увеличение качества продукции, уменьшение затрат и повышение конкурентоспособности компании на рынке.

Заключение

Целью исследования являлась разработка концепции и практическая реализация интеллектуальной системы управления мелкосерийным производственным предприятием 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:

1. Изучить теоретические основы и мировой опыт управления современным производственным предприятием в условиях быстроменяющейся конъюнктуры рынка продукции, подходы к разрешению проблем управления и влиянию на объект управления.
2. Разработать концепцию интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством с использованием существующих информационных систем и применению практик управления производственными системами.
3. Определить и проанализировать основные задачи, решаемые в рамках интеллектуальной системы управления производством.
4. Решить интеллектуальные задачи управления с применением методов математического и имитационного моделирования.
5. Реализовать на практике интеллектуальную систему управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства.
6. Апробировать разработанную интеллектуальную систему управления промышленным предприятием в условиях реального производства.

Концепция интеллектуальной системы управления для мелкосерийного производства объединяет в себе использование передовых технологий и алгоритмов искусственного интеллекта для оптимизации процессов

управления, принятия решений и анализа данных в реальном времени. Эта система включает в себя сбор, анализ и интерпретацию данных, автоматизацию рутинных операций, предсказательную аналитику, а также возможности машинного обучения для улучшения производственных процессов, снижения издержек и повышения эффективности работы предприятия. Концепция базируется на следующих принципах:

1. В качестве базовой системы для построения интеллектуальной системы управления предприятия использовать существующую на предприятии ERP-систему, в которой собраны и унифицированы все основные данные о деятельности компании в соответствии с универсальной моделью данных ERP (справочники, заказы, запасы и т.д.).
2. В рамках существующей информационной системы формируется система управления знаниями (база знаний) с целью перевода знаний от отдельных индивидов к организации.
3. На основании лучших практик оптимизации производственных систем и собственных накопленных знаний предприятия разрабатываются интеллектуальные элементы, способные использоваться как для поддержки процесса принятия решений, так и для автоматического принятия решений в условиях реального производственного процесса.
4. Интеллектуальные элементы интеллектуальной системы управления должны обладать открытыми внутренними и внешними интерфейсами для последующего развития интеллектуальной системы при изменениях во внешней среде.
5. В рамках интеллектуальной системы управления создается ситуационный центр предприятия, способный как поддерживать процесс индивидуального и коллективного принятия решений, так

и извлекать экспертный опыт и знания в процессе проработки и принятия решений.

- б. Постоянно анализировать принятые решения, осуществлять мониторинг результатов их исполнения и генерировать новые знания на основании накопленных данных и базы знаний.

В рамках работы были сформулированы математические модели для основных интеллектуальных элементов, которые при встраивании в существующее ERP-решение позволили радикально изменить систему управления предприятием в лучшую сторону, создав основу для существенного улучшения основных показателей операционной эффективности. В результате разработаны предложены следующие математические модели, которые легли в основу практической реализации интеллектуальной системы управления предприятием:

1. Модель оптимального календарного планирования производства с учетом ограничений по оборудованию, доступности материалов и персонала в условиях нечеткой исходной информации, отличающаяся учетом ограничений на все виды ресурсов, несколькими критериями оптимальности плана и использованием расширенного специального нечеткого множества над частными критериями оптимальности для построения обобщенного критерия оптимальности.
2. Модель синхронизации производственных процессов с учетом ритмичности выполнения работ и ограничений на уровень незавершенного производства, отличающаяся от частного решения теории быстро реагирующего производства большей универсальностью и расширенным спектром применения на предприятиях за счет отсутствия требований по изменению производственной логистики.

3. Модель оптимального управления производством на оперативном уровне управления 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 адекватного решения.
4. Модель поддержки принятия коллективных решений в рамках единой информационной системы предприятия, которая способна учитывать специфику предметной области и дополнительные ограничения.

Был проведен анализ существующих алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации, оценена возможность применения методов для решения задач календарного планирования, синхронизации производства, оперативного управления и принятия коллективных решений. В результате проведенного анализа было выявлено, что для рассматриваемых задач дискретной оптимизации больших размерностей применение существующих алгоритмов возможно лишь в частных случаях. Задача принятия коллективных решений решается полным перебором возможных решений, а для решения остальных задач были разработаны специальные эвристические алгоритмы.

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. Разработанная система является кроссплатформенной, кроме того, система может быть достаточно просто доработана для обеспечения совместимости с другими технологическими платформами и другими ERP-решениями. При разработке использованы лучшие практики и подходы наиболее актуальные на сегодняшний день. 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.

Инструменты решения задач оптимизации, концепция открытых интерфейсов и инструменты управления знаниями, реализованные в рамках работы, позволило создать интеллектуальную систему управления, не имеющую аналогов среди тиражных решений и позволяющую решать широкий спектр задач управления. При этом алгоритмы, знания и данные, полученные в результате решения задач управления, могут быть использованы повторно, что создает дополнительный потенциал для повышения эффективности системы управления в целом.

В результате выполнения комплекса мероприятий по испытанию интеллектуальной системы управления мелкосерийным производством получены результаты, которые позволяют утверждать, что использование интеллектуальной системы управления производством позволяет значительно повысить эффективность производства, в том числе:

1. Повысить процент выполнения плана выпуска изделий «точно в срок»;
2. Снизить уровень незавершенного производства;
3. Сократить число ошибок при планировании производства;
4. Снизить операционную нагрузку на сотрудников, осуществляющих планирование и диспетчирование производства;
5. Увеличить равномерность производства, снизить количество внеплановых работ и переработок сотрудников;

Внедрение интеллектуальной системы управления предприятием на различных промышленных предприятиях позволило существенно повысить эффективность процессов компании, получить новые преимущества на рынке, повысить стабильность работы предприятия в условиях постоянно

изменяющейся внешней среды. Достигнутые показатели представлены в таблице 37, достигнутые показатели подтверждаются актами внедрения. В таблице также приведены комментарии по влиянию достигнутых показателей на затраты и как следствие на прибыль компании.

Таблица 37. Практические результаты внедрения

№	Показатель	Значение	Комментарий
1.	Сокращение сроков выполнения заказов клиента	9%	Данный показатель приводит к увеличению прибыли компании по крайней мере в размере 9% от суммы выплачиваемых процентов по кредитам на оборотный капитал
2	Снижение количества просроченных заказов	49%	Что позволяет вдвое сократить затраты, связанные с претензионной работой по заказам клиентов
3	Снижение уровня незавершенного производства	37%	Позволяет разово высвободить предприятиям до 37% годового оборота и снизить кредитную нагрузку на соответствующую величину
4	Сокращение цикла планирования производства	50%	Позволяет сократить операционные расходы на планирование до 70% и вдвое сократить ошибки планирования
5	Сокращение объема неликвидных запасов на складах предприятий	27%	В среднем соответствует высвобождению до 7% оборотного капитала
6	Сокращение числа дефектов на производстве	15%	В среднем соответствует сокращению затрат на

№	Показатель	Значение	Комментарий
			несоответствующую продукцию на 7% и более

Создание интеллектуальной системы управления производством является следующим этапом развития систем управления производством, а применение и объединение лучших практик и подходов к управлению производством позволяет создать синергетический положительный эффект при использовании различных инструментов системы. Доказана эффективность методов и подходов при использовании на мелкосерийных машиностроительных предприятиях, производящих сложную наукоемкую продукцию, с длительными цепочками технологических этапов и длительными циклами производства.

Список литературы

1. Горский, Ю. М. Системно-информационный анализ процессов управления / Ю. М. Горский – Текст : непосредственный. – Новосибирск: Наука, 1988. – 327 с.
2. Бурков, В. Н. Большие системы: моделирование организационных механизмов / В. Н. Бурков – Текст : непосредственный. — М.: Наука, 1989. – 245 с.
3. Бурков, В. Н. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль / В. Н. Бурков, И. В. Буркова, М. В. Губко – Текст : непосредственный. — М.: ЛЕНАНД, 2013. – 216 с.
4. Бурков, В. Н. Введение в теорию управления организационными системами / В. Н. Бурков, Н. А. Коргин; под ред. Д. А. Новикова — Текст : непосредственный. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 264 с.
5. Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов – Текст : непосредственный. – М.: Стандарты и качество, 2004. – 544 с.
6. Ротер, М. Учитесь видеть бизнес-процессы. Практика построения карт потоков создания ценности / М. Ротер – Текст : непосредственный. – М.: Альпина Бизнес Букс : CBSD, Центр развития деловых навыков, 2005. – 144 с.
7. Репин, В. В. Бизнес-процессы компании: построение, анализ, регламентация / В. В. Репин – Текст : непосредственный. – М.: Стандарты и качество, 2007. – 512 с.
8. Анисимова, В. Ю. Разработка модели реинжиниринга бизнес-процессов промышленных предприятий / В. Ю. Анисимова. – Текст : непосредственный // Экономика и менеджмент систем управления. – 2017. – № 4-3. – С. 312–318.

9. Черемных, С. В. Структурный анализ систем: IDEF-технологии / С. В. Черемных, И. О. Семенов, В. С. Ручкин – Текст : непосредственный. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 424 с.
10. Маклаков, С. В. Моделирование бизнес-процессов с APFusion Process Modeler / С. В. Маклаков – Текст : непосредственный. – М.: Диалог-МИФИ, 2008. – 224 с.
11. Долганова, О. И. Моделирование бизнес-процессов / О. И. Долганова, Е. В. Виноградова, А. М. Лобанова – Текст : непосредственный. – М.: ЮРАЙТ, 2022. – 290 с. – ISBN 978-5-534-00866-1
12. Данилов, А. Н. Об одном алгоритме управления синергетической открытостью организационно-технических систем / А. Н. Данилов, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Мехатроника. Управление. Автоматизация. – 2015. – том 16. – № 6. – С. 387–395.
13. Данилов, А. Н. Оценка синергетической открытости информационных систем управления промышленным предприятием / А. Н. Данилов, С. А. Федосеев. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 12. – С. 24–27.
14. Голоктеев, К. Управление производством: инструменты, которые работают / К. Голоктеев, И. Матвеев – Текст : непосредственный. – СПб.: Питер, 2008. – 251 с.
15. Капустин, Н. М. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов, А. Г. Схиртладзе [и др.] – Текст : непосредственный. – М.: Высшая школа, 2004. – 415 с. — ISBN 5-06-004583-8.
16. Логиновский, О. В. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О. В. Логиновский, А. А. Максимов, В. Н. Бурков – Текст : непосредственный. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.

17. Логиновский, О. В. Эффективное управление организационными и производственными структурами: монография / О. В. Логиновский, А. В. Голлай, О. И. Дранко, А. В. Шестаков, А. А. Шинкарев – Текст : непосредственный. – М.: ИНФА–М, 2020. – 450 с.
18. Silver, B. BPMN Method and Style: A levels-based methodology for BPM process modeling and improvement using BPMN 2.0. / B. Silver – Текст : непосредственный. – Cody-Cassidy, 2009. – 236 p.
19. ГОСТ Р 56407-2015. Бережливое производство. Основные методы и инструменты. – М.: Стандартинформ, 2015. – 20 с.
20. Оно, Т. Канбан и «точно вовремя» на Toyota: Менеджмент начинается на рабочем месте / Т. Оно – Текст : непосредственный. – М.: Альпина Бизнес Букс., 2008. – 218 с.
21. Вумек, Дж. Машина, которая изменила мир / Дж. Вумек, Д. Джонс – Текст : непосредственный. – М.: Попурри, 2007. – 384 с.
22. Вумек, Дж. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. Вумек, Д. Джонс – Текст : непосредственный. – М.: Альпина Паблишер, 2013. – 472 с.
23. Голдратт, Э. М. Цель: процесс непрерывного улучшения / Э. М. Голдратт, Дж. Кокс – Текст : непосредственный. – М.: Логос, 2000. – 384 с.
24. Голдратт, Э. М. Цель: процесс непрерывного улучшения. Цель-2: Дело не в везенье / Э. М. Голдратт, Дж. Кокс – Текст : непосредственный. – М.: Логос, 2000. – 778 с.
25. Голдратт, Э. М. Критическая цепь / Э. М. Голдратт, М. Элияху – Текст : непосредственный. – М.: ТООС Центр, 2006. – 240 с.
26. Детмер, У. Теория ограничений Голдратта: системный подход к непрерывному совершенствованию / У. Детмер – Текст : непосредственный. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 443 с.

27. Сури, Р. Время – деньги. Конкурентное преимущество быстро-реагирующего производства; пер. с англ. В. В. Дедюхина. – 2-е изд. / Р. Сури – Текст : непосредственный. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 326 с. – ISBN 978-5-9963-2351-7
28. Уотерс, Д. Логистика. Управление цепью поставок: пер. с англ. / Д. Уотерс – Текст : непосредственный. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 503 с.
29. Эриксен, П. Управление расширенным предприятием / П. Эриксен, Р. Сури. – Текст : непосредственный // Purchasing Today. – 2001. – том 12. – № 2. – С. 58–63.
30. Федосеев, С. А. Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях / С. А. Федосеев, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов, А. В. Вожаков – Текст : непосредственный. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 229 с.
31. Оно, Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / Т. Оно – Текст : непосредственный. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2005. – 192 с.
32. Лайкер, Дж. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Дж. Лайкер – Текст : непосредственный. – М.: Альпина Паблишер, 2012. – 400 с.
33. Глухов, В. В. Производственный менеджмент. Анатомия резервов. Lean production / В. В. Глухов, Е. С. Балашова – Текст : непосредственный. – СПб.: Лань, 2008. – 354 с.
34. Goldratt, E. The Haystack Syndrome: Sifting Information Out of the Data Ocean / E. Goldratt – Текст : непосредственный. – Croton-on-Hudson, NY: The North River Press, 1990. – 319 p.
35. Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг – Текст : непосредственный. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 417 с.

36. Деминг, Э. Новая экономика: простые механизмы, которые приведут вас к росту, инновациям и сильному положению на рынке / Э. Деминг – Текст : непосредственный. – М.: Эксмо, 2006. – 208 с.
37. Fogarty, D.W. Production & Inventory Management, 2nd ed. /D.W. Fogarty, Blackstone, H. John, Hoffmann, R. Thomas – Текст : непосредственный. – Cincinnati, Ohio: Southwestern Publishing, 1991. – 870 p. – ISBN-13: 978-0538074612
38. Бахтадзе, Н. Н. Современные методы управления производственными процессами / Н. Н. Бахтадзе, В. А. Потоцкий. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2009. – № 3.1. – С. 56–63.
39. Гуд, Г. Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г. Х. Гуд, Р. Э. Макол – Текст : непосредственный. – М.: Советское радио, 1962. – 383 с.
40. Вожаков, А. В. Модели принятия коллективных решений в производственных системах /А. В. Вожаков, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Управление большими системами. – 2015. – № 58. – С. 161–178.
41. Рамеев, О. А. Основы теории многокритериального оценивания объектов с многоуровневой структурой показателей эффективности / О. А. Рамеев, В. П. Корнеенко – Текст : непосредственный. – М.: МАКС Пресс, 2018. – 416 с.
42. Вожаков, А. В. Комплексное оценивание при выборе оптимального плана производства на тактическом уровне с учетом нечетких критериев и ограничений / А. В. Вожаков, М. Б. Гитман, С. А. Федосеев. – Текст : непосредственный // Управление большими системами. – 2010. – № 30. – С. 164–179.

43. Рыков, А. С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация / А. С. Рыков – Текст : непосредственный. – М.: Изд-во МИСИС, 2005. – 352 с.
44. Андрейчиков, А. В. Интеллектуальные информационные системы / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова – Текст : непосредственный. — М.: Финансы и статистика, 2004. – 424 с.
45. Гаврилов, А. В. Гибридные интеллектуальные системы / А. В. Гаврилов – Текст : непосредственный. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 142 с.
46. Гаврилов, Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II / Д. А. Гаврилов – Текст : непосредственный. – СПб.: Питер, 2002. – 352 с.
47. Доан, М. Синяя книга SAP. Краткий бизнес-путеводитель по миру SAP / М. Доан – Текст : непосредственный. – М.: «Эксперт РП», 2013. – 224 с.
48. Питеркин, С. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем / С. В. Питеркин, Н. А. Оладов, Д. В. Исаев – Текст : непосредственный. – М.: Альпина Паблишер, 2002. – 368 с.
49. Сох, J. F. APICS Dictionary / J. F. Сох – Текст : непосредственный. – The Educational Society for Resource Management, 2006. – 104 p.
50. Бермудес, Дж. Системы оптимизированного производственного планирования: новая причуда или прорыв в области управления производством и цепочками поставок / Дж. Бермудес — Текст : непосредственный. — AMR Research. – 219 с.
51. World Manufacturing Execution Systems (MES) Market. – Текст : электронный // Frost & Sullivan: Mountain View, CA, USA (2010). RESEARCH CODE: PBE5-01-00-00-00 : [сайт]. – URL: <https://store.frost.com/world-manufacturing-execution-systems-market.html> (дата обращения: 16.04.2023)

52. McClellan, M. Applying Manufacturing Execution Systems; 1st Edition. / М. McClellan – Текст : непосредственный. – CRC Press, 1997. – 208 р.
53. Лопатников, Л. И. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки / Л. И. Лопатников – Текст : непосредственный. – М.: Дело, 2003. – 520 с.
54. Goodfellow, R. Manufacturing Resource Planning / R. Goodfellow – Текст : непосредственный. – A Pocket Guide, 1993. – 52 р.
55. Greene, J. H. Production and Inventory Control Handbook / J. H. Greene – Текст : непосредственный. – Falls Church, VA: American Production and Inventory Control Society, 1997. – 1200 р.
56. О’Лири, Д. ERP-системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия / Д. О’Лири – Текст : непосредственный. – М.: ООО «Вершина», 2004. – 272 с.
57. Gaither N. Production and operations management / N. Gaither, G. Frazier – Текст : непосредственный. – Cincinnati: South-Western College Publishing, 1999. – 864 р. – ISBN-13: 978-0324066852
58. Sumner, M. Enterprise Resource Planning / M. Sumner – Текст : непосредственный. – Pearson, 1st Edition, 2004. – 208 р. – ISBN 0131403435, 978-0131403437
59. Пейн, Э. Руководство по CRM. Путь к совершенствованию менеджмента клиентов / Э. Пейн – Текст : непосредственный. – Минск: Гревцов Паблицер, 2007. – 384 с.
60. Волгин, В. В. Склад. Логистика, управление, анализ / В. В. Волгин – Текст : непосредственный. – М.: Дашков и Ко, 2007. – 736 с.
61. Аристова, Н. И. Автоматизация адаптивных производств / Н. И. Аристова, В. М. Чадеев. – Текст : непосредственный // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022). – 2022. – С. 424–427.

62. Blanc, P. A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application / P. Blanc, I. Demongodin, P. Castagna. – Текст : непосредственный // Engineering applications of artificial intelligence. – 2008. – vol. 21. – № 3. – P. 315–330. – Ст. на англ. языке.
63. Beregi, R. Manufacturing execution system integration through the standardization of a common service model for cyber-physical production systems / R. Beregi. – Текст : непосредственный // Applied Sciences. – 2021. – vol. 11. – № 16. – P. 75–81. – Ст. на англ. языке.
64. Hu, Z. A Multi-stage Stochastic Programming for Lot-sizing and Scheduling under Demand Uncertainty / Z. Hu, G. Hu. – Текст : непосредственный. – DOI.org/10.1016/j.cie.2018.03.033 // Computers & Industrial Engineering. – 2018. – vol. 119. – P. 157–166. – Ст. на англ. языке.
65. Liu, Q. Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling / Q. Liu, M. Dong, F.F. Chen, W. Lv. – Текст : непосредственный // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2018. – vol. 51. – P. 238–247. – Ст. на англ. языке.
66. Mahdieh, M. A Novel Flexible Model for Lot sizing and Scheduling with Non-Triangular, Period Overlapping and Carryover Setups in Different Machine Configurations / M. Mahdieh, A. Clark, M. Bijari. – Текст : непосредственный // Flexible Services and Manufacturing Journal. – 2017. – № 30. – P. 884–923. – Ст. на англ. языке.
67. Potekhin, V. V. Developing manufacturing execution system with predictive analysis / V. V. Potekhin, A. H. Bahrami, B. Katalinič. – Текст : непосредственный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – vol. 966. – № 1. – P. 012117. – Ст. на англ. языке.

68. Sivasundari, M. Production, Capacity and Workforce Planning: A Mathematical Model Approach / M. Sivasundari, K. Suryaprakasa, R. Raju. – Текст : непосредственный // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2019. – № 13 (3). – P. 369–382. – Ст. на англ. языке.
69. Browne, J. Production management systems: an integrated perspective / J. Browne, J. Harhen, J. Shivnan – Текст : непосредственный. – Addison-Wesley Publishing Company, 1996. – 284 p.
70. Ling, R. C. Orchestrating Success: Improve Control of the Business with Sales & Operations Planning / R. C. Ling, W. E. Goddard – Текст : непосредственный. – John Wiley & Sons, Inc., 1995. – 176 p.
71. Majstorovic, V. ERP in industry 4.0 context / V. Majstorovic. – Текст : непосредственный // IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. – Springer, Cham. – 2020. – P. 287–294. – Ст. на англ. языке.
72. Eberl, U. Innovative Minds. A Look Inside Siemens' Idea Machine / U. Eberl, J. Puma – Текст : непосредственный. – John Wiley and Sons, 2007. – 259 p. – ISBN 3895782998
73. Cunha, L. Manufacturing Pioneers Reduce Costs By Integrating PLM & ERP / L. Cunha. – Текст : электронный // onwindows. com. Retrieved 7. – 2017. – URL: <https://community.dynamics.com/ax/b/toincreaseblogax/posts/manufacturing-pioneers-reduce-costs-by-integrating-plm-amp-erp> (дата обращения: 16.04.2023)
74. Hermann, M. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios / M. Hermann, B. Otto, T. Pentek. – Текст : электронный // Technische Universität Dortmund. – 2016. – URL: https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles

_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review (дата обращения: 16.04.2023)

75. Тимковский, В. Г. Дискретная математика в мире станков и деталей / В.Г. Тимковский – Текст : непосредственный. – М.: Наука, 1992. – 144 с.
76. Vandeput, N. Data Science for Supply Chain Forecast / N. Vandeput – Текст : непосредственный. – Independently published, 2018. – 237 p. – ISBN: 978-1730969430, 1730969437
77. Liu, S. Integration of decision support systems to improve decision support performance / S. Liu. – Текст : непосредственный // Knowledge and Information Systems. – 2010. – vol. 22. – № 3. – P. 261–286. – Ст. на англ. языке.
78. Marakas, G. M. Decision support systems in the 21st century / G. M. Marakas – Текст : непосредственный. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2003. – 134 p.
79. Negash, S. Business intelligence / S. Negash, P. Gray. – Текст : непосредственный // Handbook on decision support systems 2. – Springer, Berlin, Heidelberg. – 2008. – P. 175–193. – Ст. на англ. языке.
80. Васильев, Д. Н. Интеллектуальные информационные системы: основы теории построения / Д. Н. Васильев, В. Г. Чернов – Текст : непосредственный. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 120 с.
81. Колтунов, В. В. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими / В. В. Колтунов, Ю. И. Кудинов. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы. – 2016. – том 2. – С. 492582.
82. Кузнецов, О. П. Интеллектуализация поддержки управляющих решений и создание интеллектуальных систем / О. П. Кузнецов. –

- Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2009. – № 3.1. – С. 64–72.
83. Макаров, И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, С. В. Манько, В. М. Лохин – Текст : непосредственный. – СПб.: Наука, 2006. – 333 с.
84. Аверкин, А. Н. Толковый словарь по искусственному интеллекту / А. Н. Аверкин, М. Г. Гаазе-Рапопорт, Д. А. Поспелов – Текст : непосредственный. – М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.
85. Медведев, В. С. Нейронные сети. Matlab 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин – Текст : непосредственный. – М.: Диалог-Мифи, 2002. – 496 с.
86. Курганова, Н. В. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н. В. Курганова, М. А. Филин, Д. С. Черняев. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – vol 7. – No 5. – P. 105–114.
87. Голлай, А. В. Need of developing information systems of managing a technology lifecycle of industrial enterprises / А. В. Голлай. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ, серия: «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – том 19. – № 2. – С. 153–159. – Ст. на англ. языке.
88. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. Стандартиформ. Дата обращения 19 декабря 2018.
89. Лимарев, А. С. Повышение эффективности производства на основе совершенствования систем менеджмента качества / А. С. Лимарев, И. Г. Гун, И. Ю. Мезин. – Текст : непосредственный // В сборнике: Современные достижения университетских научных школ. Сборник

- докладов национальной научной школы-конференции. – 2020. – С. 127–135.
90. Мезин, И. Ю. Современные подходы к управлению качеством продукции для железнодорожной отрасли / И. Ю. Мезин, И. Г. Гун, А. С. Лимарев, М. Ю. Ушаков, В. Л. Стеблянко, С. А. Федосеев. – Текст : непосредственный // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2017. – том 15. – № 3. – С. 54–61.
91. Гаршина, О. П. Направления повышения производительности труда на предприятиях машиностроения / О. П. Гаршина. – Текст : непосредственный // Вестник самарского государственного университета. – 2013. – № 1 (102). – С. 164–170.
92. Цыганов, В. В. Интеллектуальное предприятие: механизмы овладения капиталом и властью / В. В. Цыганов, В. А. Бородин, Г. Б. Шишкин – Текст : непосредственный. – М.: Университетская книга, 2004. – 768 с.
93. Ясницкий, Л. Н. Интеллектуальные системы / Л. Н. Ясницкий – Текст : непосредственный. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 221 с.
94. Deisenroth, M. Mathematics for Machine Learning / M. Deisenroth – Текст : непосредственный. – Cambridge University Press, 2020. – 398 p. – ISBN: 1108470041, 978-1108470049
95. Kroese, D. Data Science and Machine Learning: Mathematical and Statistical Methods / D. Kroese, Z. Botev, T. Taimre, R. Vaisman – Текст : непосредственный. – Chapman and Hall / CRC, 2019. – 532 p. – ISBN: 978-1138492530, 1138492531
96. Федеральный закон "Об информации, информационных технологиях и о защите информации" от 27.07.2006 N 149-ФЗ (последняя редакция)

97. ГОСТ 34.003-90". Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы.
98. ГОСТ Р ИСО/МЭК 38500-2017 Информационные технологии СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИТ В ОРГАНИЗАЦИИ
99. Quinn, J. B. The intelligent enterprise a new paradigm / J. B. Quinn. – Текст : непосредственный // Academy of Management Perspectives. – 2005. – vol. 19. – № 4. – P. 109–121. – Ст. на англ. языке.
100. Gupta, J. N. D. Intelligent enterprises of the 21st century / J. N. D. Gupta, S. K. Sharma – Текст : непосредственный. – IGI Global, 2004. – 344 p.
101. Lee, C. H. Integration of ERP and Internet of Things in Intelligent Enterprise Management / C. H. Lee, T. J. Ding, Z. H. Lin. – Текст : непосредственный // 2018 1st International Cognitive Cities Conference (IC3). – IEEE, 2018. – P. 246–247. – Ст. на англ. языке.
102. Goundar, S. How artificial intelligence is transforming the ERP systems / S. Goundar. – Текст : непосредственный // Enterprise systems and technological convergence: Research and practice. – 2021. – P. 85–98. – Ст. на англ. языке.
103. Kumar, K. D. Computers in manufacturing: towards successful implementation of integrated automation system / K. D. Kumar. – Текст : непосредственный // Technovation. – 2005. – vol. 25. – № 5. – P. 477–488. – Ст. на англ. языке.
104. Schoemaker, P. J. H. Building a more intelligent enterprise / P. J. H. Schoemaker, P. E. Tetlock. – Текст : непосредственный // MIT Sloan Management Review. – 2017. – vol. 58. – № 3. – P. 28. – Ст. на англ. языке.
105. Цыганов, В. В. Механизмы общественной безопасности на основе искусственного интеллекта / В. В. Цыганов. – Текст : непосредственный // В сборнике: Проблемы управления

- безопасностью сложных систем. Материалы XXIX международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 34–40.
106. Wang, F. Y. The emergence of intelligent enterprises: From CPS to CPSS / F. Y. Wang. – Текст : непосредственный // IEEE Intelligent Systems, 2010. – vol. 25. – № 4. – P. 85–88. – Ст. на англ. языке.
107. Tsyganov, V. V. Coaching in energy efficiency control of manufacturing / V. V. Tsyganov. – Текст : непосредственный // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2020. – P. 42010. – Ст. на англ. языке.
108. Столбов, В. Ю. Модель интеллектуальной системы управления производством / В. Ю. Столбов, С. А. Федосеев. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2006. – № 5. – С. 36–39.
109. Энтروпийный подход к управлению производством с учетом стратегических целей предприятия / К. С. Пустовойт, Н. Ю. Бухвалов, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2012. – № 6. – С. 32–39.
110. Стратегическое партнерство вузов и бизнес-сообщества / А. А. Ташкинов, Н. А. Шевелев, А. Н. Данилов, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Университетское управление: практика и анализ. – 2011. – № 6. – С. 18–23.
111. Пустовойт, К. С. Повышение открытости производственной системы с учетом интересов внешних и внутренних потребителей / К. С. Пустовойт, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы экономики. – 2012. – № 8. – С. 440–451.
112. Вожаков, А. В. Интеллектуальные информационные системы управления предприятием: модели и практики / А. В. Вожаков, В. Ю.

- Столбов, С. А. Федосеев – Текст : непосредственный. – М.: Университетская книга, 2021. – 304 с.
113. Вожаков, А. В. Ситуационный центр как инструмент интеллектуализации системы управления производством / А. В. Вожаков, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2 (22). – С. 45–49.
114. Коренная, К. А. Модели управления промышленными предприятиями в условиях нестабильности внешней среды и необходимости технического перевооружения / К. А. Коренная, А. В. Голлай, О. В. Логиновский. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2021. – № 4. – С. 40–49.
115. Рыбина, Г. В. Основы построения интеллектуальных систем / Г. В. Рыбина – Текст : непосредственный. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 432 с.
116. Вожаков, А. В. Алгоритм принятия управленческих решений на базе ситуационного центра промышленного предприятия / А. В. Вожаков, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 8. – С. 8–12.
117. Алгоритм принятия коллективных решений в рамках ситуационного центра предприятия / А. В. Вожаков, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов, А. С. Елисеев. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – № 2. – С. 63–74.
118. Бурков, В. Н. Теория активных систем: состояние и перспективы / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков – Текст : непосредственный. —М.: Синтег, 1999. – 128 с.
119. Srinivasan, V. The intelligent enterprise in the era of big data / V. Srinivasan – Текст : непосредственный. – John Wiley & Sons, 2016. – 216 p.

120. Васин, С. М. Управление рисками на предприятии / С. М. Васин, В. С. Шутов – Текст : непосредственный. — М.: Кнорус, 2010. – 304 с.
121. Bartak, R. On Modelling Planning and Scheduling Problems with Time and Resources / R. Bartak, T. Grant, C. Witteveen. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 21th workshop of UK Planning and Scheduling Special Group. – 2002. – P. 87–98. – Ст. на англ. языке.
122. Фатьянова, А. А. Сравнение 1С ERP с зарубежными ERP-системами / А. А. Фатьянова. – Текст : непосредственный // Факторы успеха. – 2018. – № 2. – С. 117–120.
123. Власова, Л. Г. Концепция прикладного решения «1С:ERP Управление предприятием 2» / Л. Г. Власова – Текст : непосредственный. – М.: 1С-Паблишинг. – 134 с.
124. Rojek, I. Hybrid artificial intelligence system in constraint based scheduling of integrated manufacturing ERP systems / I. Rojek, M. Jagodziński. – Текст : непосредственный // International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg. – 2012. – P. 229–240. – Ст. на англ. языке.
125. Loshin, D. Business Intelligence / D. Loshin – Текст : непосредственный. – Elsevier, 2010. – 270 p.
126. Дьячко, А. Г. Математическое и имитационное моделирование производственных систем / А. Г. Дьячко – Текст : непосредственный. – М.: МИСИС, 2007. – 540 с.
127. Джанетто, К. Управление знаниями. Руководство по разработке и внедрению корпоративной стратегии управления знаниями / К. Джанетто, Э. Уилер – Текст : непосредственный. – М.: Хорошая книга, 2005. – 192 с.
128. Нариньяни, А. С. НЕ-факторы и инженерия знаний: от наивной формализации к естественной прагматике / А. С. Нариньяни. – Текст : непосредственный // Сборник трудов IV национальной

- конференции по Искусственному Интеллекту. – 1994. – том 1. – С. 9–18.
129. Сорокин, А. Б. Проектирование базы знаний для экспертных систем на основе концептуальной структуры акта деятельности / А. Б. Сорокин, Е. В. Бражникова, Л. М. Железняк. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2020. – том 4. – № 1. – С. 190–196.
130. Старцева, Е. Б. Этапы построения модульной структуры базы знаний экспертной системы на основе системного подхода / Е. Б. Старцева. – Текст : непосредственный // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2006. – том 7. – № 2. – С. 178–181.
131. Юрин, А. Ю. Нотация для проектирования баз знаний продукционных экспертных систем / А. Ю. Юрин. – Текст : непосредственный // Объектные системы. – 2016. – № 12. – С. 48–54.
132. Сергиенко, М. А. Методы проектирования нечеткой базы знаний / М. А. Сергиенко. – Текст : непосредственный // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2008. – № 2. – С. 67–71.
133. Калашников, В. В. Сложные системы и методы их анализа / В. В. Калашников – Текст : непосредственный. – М.: Знание, 1980. – 64 с.
134. Гитман, М. Б. Управление социально-техническими системами с учетом нечетких предпочтений / М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов, Р. Л. Гилязов – Текст : непосредственный. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 272 с.
135. Борисов, А. Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А. Н. Борисов – Текст : непосредственный. – М.: Радио и связь, 1989. – 302 с.
136. Андронникова, Н. Г. Механизмы нечеткой активной экспертизы / Н. Г. Андронникова, С. В. Леонтьев, Д. А. Новиков. – Текст :

- непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 8. – С. 128–135.
137. Шер, А. П. Согласование нечетких экспертных оценок и функция принадлежности в методе размытых множеств / А. П. Шер. – Текст : непосредственный // В кн.: Моделирование и исследование систем автоматического управления. – 1978. – С. 111–118.
138. Харитонов, В. А. Проблема принятия решений в задачах регулирования арендных отношений в интересах малого бизнеса / В. А. Харитонов, К. А. Гуреев. – Текст : непосредственный // Вестник Перм. ун-та. Экономика. – 2009. – № 2 (2). – С. 24–33.
139. Алескеров, Ф. Т. Бинарные отношения, графы и коллективные решения / Ф. Т. Алескеров, Э. Л. Хабина, Д. А. Шварц – Текст : непосредственный. – М.: Физматлит, 2012. – 341 с.
140. Пупков, К. А. Интеллектуальные системы (Исследование и создание) / К. А. Пупков, В. Г. Коньков – Текст : непосредственный. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 194 с.
141. Tsyganov, V. V. Adaptive identification of innovative production function of corporation / V. V. Tsyganov. – Текст : непосредственный // FME Transactions. – 2019. – vol. 47. – № 4. – P. 691–968. – Ст. на англ. языке.
142. Цыганов, В. В. Самообучение ранжированию предприятия железнодорожного транспорта по энергоэффективности / В. В. Цыганов, А. А. Роцин. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (46). – С. 69–80.
143. Цыганов, В. В. Модели, методы и информационные технологии управления безопасностью активных систем при пределах роста / В. В. Цыганов, В. О. Корепанов. – Текст : непосредственный // Информационные войны. – 2019. – № 4 (52). – С. 62–70.

144. Meyer, H. Manufacturing Execution Systems: Optimal Design / H. Meyer, F. Fuchs, K. Thiel – Текст : непосредственный. – Planning and Deployment, 2009. – 248 p.
145. Mangey, R. Advances in Mathematics for Industry 4.0. 1st edn. / R. Mangey – Текст : непосредственный. – Academic Press, 2020. – 420 p.
146. Shojaeinasab, A. Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review / A. Shojaeinasab. – Текст : непосредственный // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – vol. 62. – P. 503–522. – Ст. на англ. языке.
147. Розенберг, И. Н. Ситуационный центр как сложная организационно-техническая система / И. Н. Розенберг. – Текст : непосредственный // Славянский форум. – 2019. – № 4. – С. 129–138.
148. Пустовойт, К. С. Ситуационный центр предприятия как эффективный инструмент согласования интересов потребителя и производителя продукции / К. С. Пустовойт, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы экономики. – 2014. – № 5. – С. 538–547.
149. Манушин, Э. А. Учебный ситуационный центр как среда обучения групповому принятию решений / Э. А. Манушин, А. И. Митин – Текст : непосредственный. – М.: Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 2007. – 46 с.
150. Истомин, Д. А. Имитационная модель управления стратегическим развитием промышленного предприятия / Д. А. Истомин, М. Б. Гитман. – Текст : непосредственный // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2017. – том 20. – № 2. – С. 150–153.
151. Вожаков, А. В. Задача оперативного управления производством с использованием базы знаний и нечетких предпочтений при подборе ресурсов / А. В. Вожаков. – Текст : непосредственный // Вестник

- Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2019. – № 1. – С. 77–90.
152. Вожаков, А. В. Задача перепланирования как часть комплексной задачи управления производством / А. В. Вожаков, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Труды международной научно-практической конференции «Теория активных систем» (14-16 ноября 2011 года, Москва, Россия). – 2011. – том 3. – С. 32–35.
153. Бром, А. Синхронизация потоков-инструмент управления целями поставок / А. Бром. – Текст : непосредственный // Логистика. – 2007. – № 4. – С. 14–16.
154. Вожаков, А. В. Синхронизированная система управления мелкосерийным производством / А. В. Вожаков. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. – 2017. – № 8. – С. 6–10.
155. Саратов, А. А. Синхронизация работы цехов в позаказном производстве / А. А. Саратов. – Текст : непосредственный // Автомат. и телемех. – 2021. – № 3. – С. 138–148.
156. Vozakov, A. Synchronization and management of material flows in small-scale production / A. Vozakov, M. Gitman, V. Stolbov. – Текст : непосредственный // Advances in Engineering Research. – 2018. – vol. 157. – P. 622–626. – Ст. на англ. языке.
157. Такеда, Х. Синхронизированное производство / Х. Такеда – Текст : непосредственный. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 288 с.
158. Блишун, А. Ф. Сравнительный анализ методов измерения нечеткости / А. Ф. Блишун. – Текст : непосредственный // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1988. – № 5. – С. 152–175.

159. Борисов, А. Н. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной / А. Н. Борисов – Текст : непосредственный. — Рига: Зинатне, 1982. – 256 с.
160. Вожаков, А. В. Автоматизация планирования производства в рамках единой информационной системы многопрофильного предприятия / А. В. Вожаков, С. Н. Евстратов, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 2. – С. 13–16.
161. Загидуллин, Р. Р. Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах / Под. ред. В. Ц. Зориктуева, Р. Р. Загидуллин – Текст : непосредственный. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 208 с.
162. Федосеев, С. А. Модель календарного планирования производства с нечеткими целями и ограничениями / С. А. Федосеев, А. В. Вожаков, М. Б. Гитман. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 3 (37). – С. 21–24.
163. Зайченко, Ю. П. Исследование операций: нечеткая оптимизация / Ю. П. Зайченко – Текст : непосредственный. – Киев: Выща школа, 1991. – 191 с.
164. Кудинов, Ю. И. Нечеткие регуляторы и системы управления / Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пащенко. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2004. – № 3. – С. 2–14.
165. Алескеров, Ф. Т. Пороговое агрегирование трехградационных ранжировок / Ф. Т. Алескеров, Д. А. Юзбашев, В. И. Якуба. – Текст : непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 1. – С. 147–152.
166. Подиновский, В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В. В. Подиновский – Текст : непосредственный. – М.: Физматлит, 2007. – 64 с.

167. Жирнов, В. И. Многокритериальная модель кластеризации с нежесткими ограничениями / В. И. Жирнов, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // ИТ – S&E'05 : тр. XXXII Междунар. конф. (Гурзуф). – 2005. – С. 61–62.
168. Акулич, И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах / И. Л. Акулич – Текст : непосредственный – М.: Высшая школа, 1986. – 319 с. – ISBN 5-06-002663-9.
169. Абрамов, Л. М. Математическое программирование / Л. М. Абрамов, В. Ф. Капустин — Текст : непосредственный. — Л.: ЛГУ, 1981. — 328 с.
170. Ашманов, С. А. Теория оптимизации в задачах и упражнениях / С. А. Ашманов, А. В. Тимохов — Текст : непосредственный. — М.: Наука, 1991. — 446 с.
171. Васильев, Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф. П. Васильев – Текст : непосредственный. — М.: Наука, 1988. – 552 с.
172. Ермаков, С. М. О случайном поиске глобального экстремума / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский. – Текст : непосредственный // Теория вероятностей и ее применения. – 1983. – № 1. – С. 129–136.
173. Кочетов, Ю. А. Вычислительные возможности локального поиска / Ю. А. Кочетов. – Текст : непосредственный // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2008. – том 48. – № 5. – С. 788–807.
174. Корнеев, А. М. Исследование точности и скорости сходимости алгоритмов стохастической оптимизации функций на многомерном пространстве / А. М. Корнеев, А. В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник АГТУ. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 3. – С. 26–37.

175. Zhigljavsky, A. Stochastic Global Optimization / A. Zhigljavsky, A. Zilinskas – Текст : непосредственный. – Berlin: Springer, 2008. – 262 р.
176. Лопатин, А. С. Метод отжига / А. С. Лопатин. – Текст : непосредственный // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2005. – № 1. – С. 133–149.
177. Белянова, М. А. Метод имитации отжига и его применение при решении оптимизационных задач / М. А. Белянова. – Текст : непосредственный // Молодежный научно-технический вестник. – 2016. – № 3. – С. 26.
178. Калашников, А. В. Параллельный алгоритм имитации отжига для построения многопроцессорных расписаний / А. В. Калашников, В. А. Костенко. – Текст : непосредственный // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 3. – С. 101–110.
179. Савин, А. Н. Применение алгоритма оптимизации методом отжига на системах параллельных и распределенных вычислений / А. Н. Савин, Н. Е. Тимофеева. – Текст : непосредственный // Известия Саратовского университета, серия: Математика. Механика. Информатика. – 2012. – том 12. – № 1. – С. 110–116.
180. Forman, M. C. Simulated Annealing for Optimisation and Characterisation of Quantisation Parameters in Integral 3D Image Compression / M. C. Forman, A. Aggoun, M. McCormick. – Текст : непосредственный // The Institute of Mathematics and its Applications. Horwood. – 2000. – P. 393–413. – Ст. на англ. языке.
181. Gelfand, S. B. Simulated annealing with noisy or imprecise energy measurements / S. B. Gelfand, S. K. Mitter. – Текст : непосредственный // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1989. – P. 49–62. – Ст. на англ. языке.

182. Haddock, J. Simulation optimization using simulated annealing / J. Haddock, J. Mittenthal. – Текст : непосредственный // Computers and Industrial Engineering. – 1922. – vol. 22. – № 4. – P. 387–395. – Ст. на англ. языке.
183. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польского И. Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский – Текст : непосредственный. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
184. Goldberg, D. E. Genetic Algorithms and Machine Learning / D. E. Goldberg, J. N. Holland. – Текст : непосредственный. – DOI.org/10.1023/A:1022602019183 // Machine Learning 3. – 1988. – P. 95–99. – Ст. на англ. языке.
185. Карпенко, А. П. Обзор методов роя частиц для задачи глобальной оптимизации / А. П. Карпенко, Е. Ю. Селиверстов. – Текст : непосредственный // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2009. – № 3. – С. 11–18.
186. Кошур, В. Д. Глобальная оптимизация на основе гибридного метода усреднения координат и метода роя частиц / В. Д. Кошур. – Текст : непосредственный // Вычислительные технологии. – 2013. – том 18. – № 4. – С. 36–47.
187. Gun, I. G. Numerical model of the forming process for integral assemblies of ball joints using plastic deformation via rolling-up / I. G. Gun, I. Yu. Mezin. – Текст : непосредственный // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – № 1. – P. 41–44. – Ст. на англ. языке.
188. Development of new steel grades for automotive ball studs and their implementation into the manufacturing process / I. G. Gun, I. A. Mikhailovsky, I. Y. Mezin, A. S. Limarev. – Текст : непосредственный // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2017. – vol. 52. – № 4. – P. 642–646. – Ст. на англ. языке.

189. Курейчик, В. М. Использование роевого интеллекта в решении протрудных задач / В. М. Курейчик, А. А. Кажаров. – Текст : непосредственный // Известия Южного федерального университета. – 2011. – том 120. – № 7. – С. 30–36.
190. Kennedy, J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart. – Текст : непосредственный // Proceedings of IEEE International conference on Neural Networks. – 1995. – P. 1942–1948. – Ст. на англ. языке.
191. Штовба, С. Д. Муравьиные алгоритмы / С. Д. Штовба. – Текст : непосредственный // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 70–75.
192. Щербина, О. А. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях / О. А. Щербина. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы. – 2011. – том 15. – № 1–4. – С. 54–73.
193. Каляев, И. А. Методы и модели коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Купустян – Текст : непосредственный. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
194. Каляев, И. А. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели / И. А. Каляев, С. Г. Купустян, А. Р. Гайдук. – Текст : непосредственный // Сетевые модели в управлении. – 2011. – С. 57–89.
195. Губко, М. В. Математические модели оптимизации иерархических структур / М. В. Губко – Текст : непосредственный. – М.: Ленанд, 2006. – 264 с.
196. Галузин, К. С. Методика составления оптимального расписания с учетом предпочтений / К. С. Галузин, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Теор. и прикл. аспекты информационных технологий, ГосНИИУМС. – 2004. – № 53. – С. 43–50.

197. Гилязов, Р. Л. Управление транспортными сетями электросвязи с учетом нечетких предпочтений / Р. Л. Гилязов, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2008. – № 1. – С. 62–67.
198. Жирнов, В. И. Модель кластеризации множества заявок в условиях многокритериальной неопределенности / В. И. Жирнов, Р. В. Шилов. – Текст : непосредственный // Математическое моделирование в естественных науках : тез. докл. всерос. конф. молодых ученых (Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь). – 2004. – С. 32–33.
199. Зак, Ю. А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Ч. 2. Приближенные методы решения / Ю. А. Зак. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2010. – № 4. – С. 12–19.
200. Лазарев, Е. А. Метод ветвей и границ для оптимизации структуры сети передачи данных / Е. А. Лазарев, Д. Е. Шапошников, П. В. Мисевич. – Текст : непосредственный // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – № 14. – С. 189–193.
201. Jaskiewicz, A. Multiple objective metaheuristic algorithms for combinatorial optimization / A. Jaskiewicz – Текст : электронный // Posnan University of Technology. – 2001. – URL: https://www.researchgate.net/publication/2514923_Multiple_Objective_Metaheuristic_Algorithms_For_Combinatorial_Optimization (дата обращения: 16.04.2023)
202. Завьялкин, Д. В. 1С:Академия ERP. Управленческий учет / Д. В. Завьялкин, Е. В. Гаврилова – Текст : непосредственный. – М.: 1С-Публишинг, 2019 – 257 с.

203. Кудинов, А. В. 1С:Академия ERP. Управление продажами и взаимоотношениями с клиентами / А. В. Кудинов, А. А. Мироненко – Текст : непосредственный. – М.: 1С-Паблишинг, 2019. – 324 с.
204. Кузнецова, С. А. Проблемы формирования бизнес-экосистемы на основе цифровой платформы: на примере платформы компании 1С / С. А. Кузнецова, В. Д. Маркова. – Текст : непосредственный // Инновации. – 2018. – № 2 (232). – С. 55–60.
205. Хрусталева, Е. Ю. Облачные технологии «1С:Предприятия» / Е. Ю. Хрусталева – Текст : непосредственный. – М.: 1С-Паблишинг, 2016. – 217 с.
206. Артамонов, Ю. С. Разработка распределенных приложений сбора и анализа данных на базе микросервисной архитектуры / Ю. С. Артамонов, С. В. Востокин. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – том 18. – № 4-4. – С. 688–693.
207. Samaranayake, P. Business process integration, automation, and optimization in ERP: Integrated approach using enhanced process models / P. Samaranayake. – Текст : непосредственный // Business Process Management Journal. – 2009. – vol. 15. – № 4. – P. 504–526. – Ст. на англ. языке.
208. Huin, S. F. Knowledge-based tool for planning of enterprise resources in ASEAN SMEs / S. F. Huin, L. H. S. Luong, K. Abhary. – Текст : непосредственный // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2003. – vol. 19. – № 5. – P. 409–414. – Ст. на англ. языке.
209. Рыбалка, В. В. Мастер-класс Mobile 1С! Пример быстрой разработки мобильного приложения на платформе 1С:Предприятие 8.3. / В. В. Рыбалка – Текст : непосредственный. – М.: 1С-Паблишинг, 2014. – 329 с.

210. Хрусталева, Е. Ю. Система взаимодействия: Коммуникации в бизнес-приложениях. Разработка в системе «1С:Предприятие 8.3» / Е. Ю. Хрусталева – Текст : непосредственный. – М.: 1С-Паблишинг, 2019. – 130 с.
211. Берсегян, А. А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А. А. Берсегян — Текст : непосредственный. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.
212. Шитько, А. М. Проектирование микросервисной архитектуры программного обеспечения / А. М. Шитько. – Текст : непосредственный // Труды БГТУ, серия 3: Физико-математические науки и информатика. – 2017. – № 9 (200). – С. 122–125.
213. Altemir, D. Lean MRP: Establishing a Manufacturing Pull System for Shop Floor Execution Using ERP or APS / D. Altemir – Текст : непосредственный. – Independently published, 2018. – 109 p. – ISBN: 978-1719918107, 1719918104
214. Яковлев, А. В. Управление производством: планирование и диспетчеризация / А. В. Яковлев – Текст : непосредственный. – М.: 1С-Паблишинг, 2018. – 219 с.
215. Tsyganov, V. Intelligent information technologies in social safety / V. Tsyganov. – Текст : непосредственный // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – vol. 1084. – P. 270–284. – Ст. на англ. языке.
216. Vozhakov, A. The Practice of Creating Intelligent Manufacture Management Systems Based on an ERP / A. Vozhakov. – Текст : непосредственный // Advances in Digital Science. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – vol. 1352. – P. 327–339. – Ст. на англ. языке.

217. Таха, Х.А. Введение в исследование операций. 7-е издание / Х. А. Таха – Текст : непосредственный. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
218. Квейд, Э. Анализ сложных систем / Э. Квейд – Текст : непосредственный. – М.: Советское радио, 1969. – 520 с.
219. Li, Z. Designing ERP systems with knowledge management capacity / Z. Li, S. S. Chaudhry, S. Zhao. – Текст : непосредственный // Systems Research and Behavioral Science: The Official Journal of the International Federation for Systems Research. – 2006. – vol. 23. – № 2. – P. 191–200. – Ст. на англ. языке.
220. Первозванский, А. А. Курс теории автоматического управления / А. А. Первозванский – Текст : непосредственный. – М.: Наука, 1986. – 624 с. – ISBN: 978-5-8114-0995-2
221. Srivardhana, T. ERP systems as an enabler of sustained business process innovation: A knowledge-based view / T. Srivardhana, S. D. Pawlowski. – Текст : непосредственный // The Journal of Strategic Information Systems. – 2007. – vol. 16. – № 1. – P. 51–69. – Ст. на англ. языке.
222. Vandaie, R. The role of organizational knowledge management in successful ERP implementation projects / R. Vandaie. – Текст : непосредственный // Knowledge-Based Systems. – 2008. – vol. 21. – № 8. – P. 920–926. – Ст. на англ. языке.
223. Меерович, Г. А. Эффект больших систем / Г. А. Меерович – Текст : непосредственный. – М.: Знание, 1985. – 192 с.
224. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков – Текст : непосредственный. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2007. – 584 с.
225. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко – Текст : непосредственный. – М.: Высшая школа, 1989. – 360 с.

226. Barthel, J. Getting started with AMQP and RabbitMQ / J. Barthel. – Текст : электронный // InfoQ. – 2009. – URL:<https://www.infoq.com/articles/AMQP-RabbitMQ/> (дата обращения: 16.04.2023)
227. Dobbelaere, P. Kafka versus RabbitMQ: A comparative study of two industry reference publish/subscribe implementations: Industry Paper / P. Dobbelaere, K. S. Esmaili. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 11th ACM international conference on distributed and event-based systems. – 2017. – P. 227–238. – Ст. на англ. языке.
228. Dossot, D. RabbitMQ essentials / D. Dossot – Текст : непосредственный. – Packt Publishing Ltd, 2014. – 182 p. – ISBN 9781783983209
229. Сигов, А. С. Архитектура предметно-ориентированной базы знаний интеллектуальной системы / А. С. Сигов, В. В. Нечаев, М. И. Кошкарёв. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2014. – том 2. – № 12. – С. 1–6.
230. Аверкин, А. Н. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин – Текст : непосредственный. – М.: ЁЁ Медиа, 2012. – 312 с.
231. Zadeh, L. A. Fuzzy Sets / L. A. Zadeh. – Текст : непосредственный // Information and Control. – 1976. – vol. 8. – P. 338–353. – Ст. на англ. языке.
232. Ивченко, Г. И. Теория массового обслуживания / Г. И. Ивченко, В. А. Каштанов, И. Н. Коваленко – Текст : непосредственный. — М.: Высшая школа, 1982. — 256 с.
233. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J. H. Holland. – Текст : непосредственный // The University of Michigan Press. – 1975. – P. 228. – Ст. на англ. языке.

234. Phillips, J. *Mathematical Foundations for Data Analysis* / J. Phillips – Текст : непосредственный. – Springer, 2021. – 303 p. – ISBN: 9783030623401, 3030623408
235. Trochim, W. M. K. *Research methods knowledge base* / W. M. K. Trochim, J. P. Donnelly – Текст : непосредственный. – Macmillan Publishing Company, New York: Atomic Dog Pub., 2001. – vol. 2. – 361 p. – ISBN: 1592602916
236. Цыганов, В. В. Правильные адаптивные механизмы с идентификацией / В. В. Цыганов. – Текст : непосредственный // Проблемы управления. – 2018. – № 2. – С. 47–57.
237. Мильнер, Б. З. *Теория организации* / Б. З. Мильнер – Текст : непосредственный. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 648 с.
238. Sah, R. K. *The Committees, Hierarchies and Polyarchies* / R. K. Sah, J. E. Stiglitz. – Текст : непосредственный // *The Economic Journal*. – 1988. – vol. 98. – № 391. – P. 451–470. – Ст. на англ. языке.
239. Xu, L. *Integrating knowledge management and ERP in enterprise information systems* / L. Xu. – Текст : непосредственный // *Systems Research and Behavioral Science: The Official Journal of the International Federation for Systems Research*. – 2006. – vol. 23. – № 2. – P. 147–156. – Ст. на англ. языке.
240. Федосеев, С. А. *Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации* / С. А. Федосеев, А. В. Вожаков, М. Б. Гитман. – Текст : непосредственный // *Проблемы управления*. – 2009. – № 5. – С. 36–43.
241. Landa Silva, J. D. *A tutorial on multiobjective metaheuristics for scheduling and timetabling* / J. D. Landa Silva, E. K. Burke. – Текст : непосредственный // *University of Nottingham. Metaheuristics for Multiobjective Optimisation*. – 2004. – P. 91–129. – Ст. на англ. языке.

242. Yevstratov, S. Automation of Production Planning within an Integrated Information System of a Multi-Field Enterprise / S. Yevstratov, A. Vozhakov, V. Stolbov. – Текст : непосредственный // Automation and Remote Control. – 2014. – vol. 75. – № 7. – P. 1323–1329. – Ст. на англ. языке.
243. Bonney, M. C. Are push and pull systems really so different? / M. C. Bonney. – Текст : непосредственный // International journal of production economics. – 1999. – vol. 59. – № 1-3. – P. 53–64. – Ст. на англ. языке.
244. Kim, S. Synchronized production planning and scheduling in semiconductor fabrication / S. Kim, Y. Lee. – Текст : непосредственный // Computers & Industrial Engineering. – 2016. – № 96. – P. 72–85. – Ст. на англ. языке.
245. Вожаков, А. В. Задача синхронизации материальных потоков в мелкосерийном производстве / А. В. Вожаков, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – № 1. – С. 52–59.
246. Powell, D. Lean production and ERP systems in small-and medium-sized enterprises: ERP support for pull production / D. Powell, J. Riezebos, J. O. Strandhagen. – Текст : непосредственный // International journal of production research. – 2013. – vol. 51. – № 2. – P. 395–409. – Ст. на англ. языке.
247. Vozhakov, A. Intelligent Scheduling in MES with the Fuzzy Information and Unclear Preferences / A. Vozakov. – Текст : непосредственный // Digital Science. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – vol. 381. – P. 131–143. – Ст. на англ. языке.

Приложение №1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматизированная система планирования производства и оптимизации»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2011615956

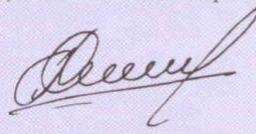
**Автоматизированная система планирования
производства и оптимизации**

Правообладатель(ли): **Вожяков Артем Викторович (RU)**

Автор(ы): **Вожяков Артем Викторович, Гитман Михаил
Борисович, Федосеев Сергей Анатольевич (RU)**

Заявка № **2011614136**
Дата поступления **6 июня 2011 г.**
Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
29 июля 2011 г.

 Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам


Б.П. Симонов

Приложение №2 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023684916

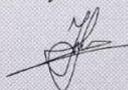
«Программный комплекс управления промышленным предприятием в условиях мелкосерийного производства»

Правообладатели: *Вожяков Артем Викторович (RU), Столбов Валерий Юрьевич (RU), Федосеев Сергей Анатольевич (RU)*

Автор(ы): *Вожяков Артем Викторович (RU)*

Заявка № **2023669346**
Дата поступления **20 сентября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **21 ноября 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


Ю.С. Зубов



Приложение №3 Акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «ИБС Софт»



**УМНЫЙ ВЫБОР
МЕНЯЮЩИХСЯ
ТЕХНОЛОГИЙ**

ООО «ИБС Софт»
ОГРН 1117746016013, ИНН/КПП 7713721689/ 77301001
Россия, 127434, Москва, Дмитровское шоссе, дом 9Б,
этаж 5, помещение XIII, комната 14
телефон/факс: +7 (495) 967-80-80
ibs@ibs.ru, www.ibs.ru

АКТ о внедрении результатов диссертационной работы Вожакова Артема Викторовича в рамках проектов Комплексной автоматизации предприятий промышленности

Компания IBS — бизнес- и технологический партнер лидеров российского бизнеса. Компания решает сложные задачи в сфере стратегического развития и повышения операционной эффективности, оказывая услуги в области оптимизации бизнес-процессов, создания систем управления, управления данными, анализа и моделирования, разработки, тестирования и сопровождения программного обеспечения, создания вычислительных центров и систем хранения и аутсорсинга обеспечивающих бизнес-процессов. На сегодняшний день клиенты компании сталкиваются с новой реальностью, которую характеризует нестабильность, неопределенность, сложность и неоднозначность. Производственные компании, специализирующиеся на сложной высокотехнологичной продукции фокусируются на реализации ERP-проектов внедрения, однако для того, чтобы быть конкурентоспособным в современном мире, такие 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. Все это требует построения по-настоящему гибкого производства, способного быстро адаптироваться к изменяющейся среде. Для этого необходимы новые инструменты управления производством, лишенные ограничений, которые диктуют системы прошлого поколения.

В работе Артема Вожакова предложена концепция создания интеллектуальных систем управления предприятием на базе существующих на рынке ERP-решений. Внедрение интеллектуальной системы управления позволяет повысить эффективность систем управления производством за счет оптимального календарного планирования производства, использования интеллектуальных инструментов синхронизации производства и оптимизации оперативного управления производством. Такая система позволяет обеспечить максимально-гибкую и при этом результативную работу производства в условиях постоянных изменений в портфеле заказов, изменчивой ситуации на производстве, недостаточности информации.

Внедрение предложенных подходов в проектах Комплексной автоматизации позволяет нашим клиентам получать лучшие результаты, внедрение интеллектуальных элементов позволяет существенно повысить эффективность процессов компании, получить новые преимущества на рынке, повысить стабильность работы предприятия в условиях постоянно изменяющейся внешней среды. Направление развития рынка интеллектуальных систем управления находится на сегодня в стадии формирования, однако практическая реализация интеллектуальных систем управления уже сегодня позволило клиентам компании:

- сократить сроки выполнения заказов клиента до 9%.
- снизить количество просроченных заказов на 49%.
- снизить уровень незавершенного производства на 37%.
- вдвое сократить цикл планирования производства.

С уважением,
Управляющий партнер ООО «ИБС Софт»



В.А. Данильчук

Приложение №4 Акт о внедрении ПАО «Мотовилихинские заводы»



МОТОВИЛИХА

Публичное акционерное общество
специального машиностроения и металлургии
“МОТОВИЛИХИНСКИЕ ЗАВОДЫ”
(ПАО “МОТОВИЛИХИНСКИЕ ЗАВОДЫ”)

1905 года ул., д.35, Пермь, 614014
Тел/факс (342) 260-71-01
ОКПО 07500243, ОГРН 1025901364708
ИНН/КПП 5906009273/590150001

Акт о внедрении программного комплекса «Автоматизированная система тактического планирования производства»

ПАО «Мотовилихинские заводы» является одним из старейших из действующих предприятий Урала, имеющим трехсотлетнюю историю, передавая ценные традиции металлургического производства из поколения в поколение. Продукция “Мотовилихинского металла” приобрела широкую известность как в России, так и за ее пределами, благодаря высочайшему качеству, делая металлургию одним из ведущих направлений на заводе. Завод также специализируется на разработке и производстве специализированной военной техники и оборудования для нефтегазового сектора. В условиях увеличения темпов и объема производства, предприятие столкнулось со сложностями планирования производства, эффективность которого необходима для обеспечения своевременного выполнения заказов и оптимизации производственных процессов. Ранее нашему предприятию часто приходилось сталкиваться с проблемами задержек в поставках и недостаточной загрузкой производственных мощностей из-за отсутствия четкой системы планирования.

В работе Артема Вожакова предложена модель процесса планирования производства, учитывающая характеристики объекта автоматизации и требования, предъявляемые к процессу планирования производства со стороны производственных подразделений и служб сбыта. Модель реализована в виде программного комплекса – «Автоматизированная система тактического планирования производства». Разработанный программный комплекс предназначен для автоматизированного составления планов производства и

позволяет находить близкие к оптимальным планы производства с учетом различных критериев и требований. Он также позволяет проводить анализ дефицита материалов и производственных мощностей. Разработанный программный комплекс внедрен в опытно-промышленную эксплуатацию и используется на данный момент при составлении плана производства. Благодаря внедрению новой системы предприятию удалось минимизировать риски срыва сроков производства и повысить эффективность производства, что положительно сказалось на качестве и своевременной поставке продукции.

Генеральный директор



Клочков Ю.П.

М.П.

Приложение №5 Акт о внедрении ЗАО «Третий Спецмаш»

Акт о внедрении результатов работы Вожакова Артема Викторовича по разработке и внедрению автоматизированной системы календарного планирования производства

ЗАО «Третий Спецмаш» производит продукцию специального машиностроения (ствольная артиллерия, реактивные системы залпового огня, продукция гражданского назначения). Предприятие производит как серийные изделия, так и участвует в производстве опытных изделий и ремонтом серийных изделий на мощностях основного производства. Работа в смешанном режиме крайне усложняет процессы управления производством и создает колоссальную нагрузку на сотрудников планово-производственного отдела и планово-распределительных бюро цехов при составлении и актуализации планов производства и диспетчировании.

В работе Вожакова Артема Викторовича предложен новый подход и математическая модель оптимизации календарного планирования производства, учитывающая доступные мощности оборудования, доступные запасы и приоритетность заказов. Модель реализована в виде автоматизированной системы календарного планирования производства, предназначенная для автоматического составления оптимальных планов. Благодаря использованию системы удалось полностью решить проблему частого срыва сроков производства, на 70% снизить трудозатраты процесса планирования, на 40% сократить вынужденные простои оборудования, ввиду отсутствия заготовок. Разработанный программный комплекс внедрен в опытную эксплуатацию в дочерних обществах холдинга ОАО «Мотовилхинские заводы» и используется на данный момент при составлении плана производства.

Директор
ЗАО «Третий Спецмаш»



Ю.Я. Пидченко
Ю.Я. Пидченко

Приложение №6 Акт о внедрении ООО «Геликон Консалтинг»



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВАШЕГО БИЗНЕСА

ООО "Геликон Консалтинг"
ИНН 5906168509, КПП 590601001
ОГРН 1205900027486, ОКПО 59870624
P/c 4070281021000001316 в Акционерном обществе Банк «Пермь»
K/c 30101810200000000756, БИК 045773756
614107, Пермский край, г. Пермь, ул. Лебедева, д. 25б, этаж 3
(342) 261-84-64, 261-85-99, 261-86-69
www.gelicon.biz, info@gelicon.biz

Утверждаю
Директор по разработке
программного обеспечения
ООО «Геликон Консалтинг»

А.Б. Беланков
25 марта 2024 г.



АКТ о внедрении результатов диссертационной работы Вожакова Артема Викторовича

Основной сферой деятельности ООО «Геликон Консалтинг» является разработка корпоративных информационных систем. Компания занимается автоматизацией бизнес-процессов средних и крупных предприятий различных отраслей отечественной экономики. Компания также разрабатывает интернет-решения, включая корпоративные порталы и личные кабинеты, и мобильные приложения, осуществляет интеграции различных информационных систем, включая ГИС, АСУТП и т.п.

В настоящее время клиенты компании сталкиваются с новой реальностью, требующей быстрой адаптации в нестабильной экономической среде. Промышленные предприятия, работающие с высокотехнологичной продукцией, фокусируются на повышении эффективности и результативности управления производством для обеспечения достаточной конкурентоспособности. Гибкое производство, способное быстро меняться в соответствии с требованиями рынка, требует создания и внедрения новых информационных системы управления, свободных от ограничений информационных систем предыдущих поколений.

В диссертационной работе Вожакова А.В. предложены новые интеллектуальные элементы для существующих на рынке ERP-систем. Применение таких интеллектуальных информационных систем способно улучшить управление производством путем оптимизации планирования и операционного управления в условиях постоянных изменений в заказах и недостатка информации для принятия решений.

Реализация предложенных Вожаковым А.В. подходов в проектах по комплексной автоматизации предприятий способствует достижению оптимальных результатов для заказчиков. Внедрение интеллектуальных элементов в бизнес-процессы предприятий существенно увеличивает их производительность и приносит дополнительные преимущества на рынке, укрепляя конкурентоспособность в быстро меняющейся внешней среде. Благодаря использованию предложенных Вожаковым А.В. подходов нашим клиентам удалось достичь следующих результатов:

- снизить затраты на управление производством 15%;
- увеличить количество своевременно выполненных заказов потребителей на 2%;
- сократить материальные запасы на 20%;
- повысить эффективность использования производственных мощностей на 10%;
- сократить затраты материально-технических ресурсов на 8 %;
- снизить потребность в трудовых ресурсах на 10 %.