

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Институт проблем точной механики и управления —
обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра
«Саратовский научный центр Российской академии наук»

На правах рукописи

Петров Дмитрий Юрьевич

**Методическое и программно-информационное обеспечение
автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью
многостадийного производства высококачественного листового стекла**

Специальность 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант
академик РАН, доктор технических наук,
профессор, заслуженный деятель науки РФ
Мешалкин В.П.

Москва - 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ	23
1.1. Современное состояние научных исследований по системному подходу к повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных непрерывных промышленных производств.....	23
1.2. Краткая характеристика современных автоматизированных систем иерархического управления непрерывными промышленными производствами высококачественной продукции.....	30
1.3. Анализ методов управления качеством продукции и надежностью непрерывных производств	48
1.4. Общая характеристика научно-исследовательских работ по автоматизированному управлению производством высококачественного листового стекла как сложной химико-технологической системы.....	59
1.5. Выводы.....	73
ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ.....	75
2.1. Системный анализ химико-технологических процессов многостадийного производства высококачественного листового стекла как объектов автоматизированного управления	75
2.2. Нейросетевая модель автоматизированного управления составом стекольной шихты как источника возникновения дефектов листового стекла.....	97
2.3. Математическая модель химико-технологического процесса формования движущейся ленты стекла.....	100
2.4. Выводы.....	111

ГЛАВА 3. ИНЖИНИРИНГ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА	113
3.1. Компьютерная нейросетевая модель управления составом стекольной шихты	113
3.2. Компьютерная модель химико-технологического процесса формования движущейся ленты стекла.....	119
3.3. Компьютерная модель позиционирования робота-манипулятора для упаковки листов стекла	125
3.4. Выводы.....	144
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА	147
4.1. Системный анализ и классификация видов дефектов листового стекла	147
4.2. Вейвлетно-нейросетевой алгоритм диагностики расположения точечных дефектов листового стекла	149
4.3. Эвристическо-продукционный алгоритм определения видов точечных дефектов листового стекла	153
4.4. Аппаратурно-техническое и программно-информационное обеспечение автоматизированной системы диагностики точечных дефектов листового стекла.....	160
4.5. Выводы.....	164
ГЛАВА 5. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА	165
5.1. Содержательная и математическая постановки задачи иерархического управления энергоэффективностью производства высококачественного листового стекла	165

5.2. Вероятно-статистический алгоритм анализа жизненного цикла многостадийного производства высококачественного листового стекла .	171
5.3. Логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей надежности производства высококачественного листового стекла.....	182
5.4. Алгоритм планирования выпуска партий многоассортиментного высококачественного листового стекла	188
5.5. Имитационное моделирование организационно-технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла.....	192
5.6. Выводы.....	198
ГЛАВА 6. ИНЖИНИРИНГ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ИЕРАРХИЧЕСКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА	
6.1. Методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства высококачественного листового стекла	201
6.2. Архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ управления диагностикой дефектов листового стекла	227
6.3. Архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ цифрового тренажера обучения операторов управлению химико-технологическим процессом формования листового стекла	243
6.4. Архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ управления планово-предупредительными ремонтами оборудования многостадийного производства высококачественного листового стекла	251
6.5. Выводы.....	257
ГЛАВА 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ	

МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА.....	259
7.1. Научно обоснованные рекомендации по оптимизации энергоресурсоэффективности многостадийного производства высококачественного листового стекла	259
7.2. Применение пакета прикладных программ автоматизированного управления составом стекольной шихты	269
7.3. Научно обоснованные рекомендации по применению пакета прикладных программ диагностики дефектов листового стекла	273
7.4. Научно обоснованные рекомендации по оптимизации показателей надежности оборудования многостадийного производства высококачественного листового стекла	278
7.5. Научно обоснованные рекомендации по применению цифрового тренажера для обучения операторов действиям в аварийных ситуациях .	281
7.6. Выводы.....	286
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ	289
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	290
БЛАГОДАРНОСТИ	292
СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	294
СПИСОК РУССКОЯЗЫЧНЫХ АББРЕВИАТУР.....	296
СПИСОК АНГЛОЯЗЫЧНЫХ АББРЕВИАТУР	297
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	299
Приложение 1. Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	364
Приложение 2. Справки о практическом использовании результатов диссертационной работы	367
Приложение 3. Глоссарий основных терминов и понятий.....	381

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Проблема рационального использования сырья и топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) особенно важна для энергоемких промышленных производств, к которым относятся многостадийные производства высококачественного листового стекла (ВЛС), представляющие собой сложные химико-технологические системы (ХТС). Качество листового стекла (ЛС) определяется как режимами функционирования сложной ХТС, так и особенностью основных химико-технологических процессов (ХТП), протекающих в взаимосвязанных стадиях производства – подсистемах ХТС: стадия приготовления шихты, стадия варки стекла, стадия формования ленты стекла методом флоат-процесса (float glass process), стадия отжига ленты стекла.

Условия обеспечения технологического лидерства РФ определяют необходимость расширения номенклатуры выпускаемого ВЛС. Нестабильность химического состава и физических свойств исходного сырья определяет необходимость выполнения затратных лабораторных исследований, в соответствии с результатами которых осуществляется изменение рецепта стекольной шихты и режимов функционирования ХТП – стадий производства ВЛС..

Применение методов инжиниринга передовых наукоемких энергоресурсосберегающих цифровизированных интеллектуальных технологий и роботизированных кибер-физических систем и использование информационных систем обработки больших массивов данных, методов машинного обучения и теории искусственного интеллекта (ИИ) имеет актуальное значение для повышения энергоресурсоэффективности отечественной стекольной промышленности и производств других строительных материалов, а также является важнейшим фактором обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

Указанные актуальные направления научно-технологического развития РФ, включая повышение энергоресурсоэффективности и уровня цифровой

трансформации российской стекольной промышленности, определены в следующих федеральных и региональных нормативно-правовых документах:

- Указ Президента РФ № 145 от 28 февраля 2024 г. «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (п. 21а);
- Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. N 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» (п. 26);
- Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» (п. 2д);
- «Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 июня 2020 г. № 1512-р;
- Постановление Правительства РФ от 15.04.2023 N 603 (ред. от 06.11.2024) «Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета и проектов структурной адаптации экономики Российской Федерации и Положения об условиях отнесения проектов к проектам технологического суверенитета и проектам структурной адаптации экономики Российской Федерации, о представлении сведений о проектах технологического суверенитета и проектах структурной адаптации экономики Российской Федерации и ведении реестра указанных проектов, а также о требованиях к организациям, уполномоченным представлять заключения о соответствии проектов требованиям к проектам технологического суверенитета и проектам структурной адаптации экономики Российской Федерации» (приложение №1, п. 8.13);
- Постановление правительства Саратовской области от 17 августа 2015 г. № 412-П «О государственной программе Саратовской области «Развитие промышленности в Саратовской области» (с изменениями на 7 ноября 2024 г.).

В Федеральном проекте «Производительность труда», входящем в состав национального проекта «Эффективная и конкурентная экономика», определены основные показатели к 2030 году и меры государственной поддержки проектов, обеспечивающих за счет цифровой трансформации и повышения цифровой зрелости на основе использования цифровых технологий для автоматизации и управления энергоресурсоэффективностью производства повышение производительности труда – ключевого фактора экономического развития, обеспечения конкурентоспособности и технологического суверенитета и технологического лидерства России. Высокий уровень автоматизации как отдельного ХТП, так и энергоресурсоэффективных многостадийных ХТС производства ВЛС при использовании мер государственной поддержки для цифровой трансформации таких предприятий способствует достижению целей этого Национального проекта.

В распоряжении Правительства РФ от 6 ноября 2021 г. N 3142-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» от 12 ноября 2021 г. определены проекты «Умное производство» и «Цифровой инжиниринг», для реализации которых необходимо разработать методологию обеспечения цифровой трансформации промышленных предприятий с использованием инструментов промышленной революции «Индустрии 4.0».

Предприятия стекольной промышленности для разработки и реализации организационно-технических мероприятий по повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных ХТП, производительности труда и объемов производства ВЛС должны решать следующие основные научно-технологические и организационно-технические задачи:

- 1) снижение риска выпуска некачественного ЛС при изменении химического состава сырья; 2) оптимальное планирование производственных заказов для сокращения простоя основного технологического оборудования при изменении технологических режимов при выпуске различных типов стекла;

3) сокращение длительности хранения готового стекла на складе для повышения скорости использования оборотных средств; 4) повышение навыков и опыта у производственного персонала по предотвращению аварийных ситуаций для сокращения ущерба от аварийных ситуаций на производстве;

5) повышение уровня заинтересованности работников в интенсивном переходе к цифровой трансформации производства и использовании инструментов «Индустрия 4.0».

На основании вышеизложенного, поставленная и решаемая в настоящей диссертационной работе **новая научная проблема** разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированных систем управления (АСУ) энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС как сложной ХТС **является актуальной** проблемой, успешное решение которой имеет важное экономическое значение для повышения эффективности и конкурентоспособности российской стекольной промышленности, для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

Степень разработанности темы исследования. Повышению эффективности автоматизированных многостадийных непрерывных производств на основе применения методов системного анализа, теории анализа и оптимизации сложных ХТС посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых. К ним относятся фундаментальные научные труды академиков АН СССР В.М. Глушкова, В.В. Кафарова и В.А.Трапезникова; академиков РАН Ю.С. Васильева, С.Н. Васильева, Д.А. Новикова, В.Л. Макарова, В.П. Мешалкина и П.Д. Саркисова; членов-корреспондентов РАН Н.А. Махутова и А.Ф. Резчикова; научные работы профессоров А.А. Большакова, В.И. Бобкова, Е.М. Васильева, М.Б. Глебова, И.Н. Дорохова, А.Ф. Егорова, Э.Л. Ицковича, В.Н. Козлова, Э.М.Кольцовой, Ю.В. Литовко, М.Ю.Лившица, Р.И. Макарова, Н.В. Меньшутиной, Е.Р.Мошева, Ф.Ф. Пащенко, Н.А. Спирина, Е.Р. Хорошевой, Т.Б. Чистяковой и

А.И. Шинкевича, а также зарубежных ученых В. Dwyer, В. Chen, J.O. Grady, O.S. Narayanaswamy, J.C. Principe, Н. Krallmann, J.L. Whitten и др.

Методы и алгоритмы цифрового инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС и их применение для автоматизации непрерывных сложных производств химического, строительного и нефтегазового комплекса разработаны научной школой академика РАН В.П. Мешалкина, предложившего и успешно развивающего новое направление в области цифровизированных производств химического и нефтегазохимического комплекса «Теоретические основы инжиниринга и логистики энергоресурсоэффективных экологически безопасных химико-технологических систем производства высококачественной продукции и переработки отходов».

Существенный вклад в разработку методов математического моделирования ХТП, в том числе ХТП производства ЛС, внесли советские и российские ученые: академик АН СССР В.В. Кафаров и академик АН СССР Н.Е. Кочин, академик РАН В.В. Окрепилов и академик РАН В.Л. Макаров, член-корреспондент АН СССР Н.П. Бусленко, профессора А.А. Большаков, Т.А. Барбасова, А.М. Бессарабов, В.И. Бобков, О.Б. Бутусов, Т.Н. Гартман, А.В. Борщёв, А.В. Гороховский, М.Б. Глебов, А.В. Вязьмин, И.Н. Дорохов, В.Э. Джашитов, А.Ф. Егоров, В.В. Ефременков, Э.М. Кольцова, В.А. Коваль, П.Н. Лабутин, М.Ю. Лившиц, Н.Н. Макеев, В.Е. Маневич, Н.В. Меньшутина, Н.П. Митяшин, А.С. Можаяев, В.М. Панкратов, Э.Я. Рапопорт, Я.Г. Сапунков, В.Ф. Солинов, М.Ф. Степанов, М.Г. Степаненко, К.Ю. Субботин, В.А. Твердохлебов, Ю.И. Толуев, Т.Б. Чистякова, а также зарубежные ученые R. Conradt, D. Harel, R. Hartwell, O.S. Narayanaswamy, G. Schuh и др.

Методы автоматизированного управления (АУ) качеством продукции непрерывных производств химических и нефтехимических комплексов предложены в работах отечественных и зарубежных ученых: профессоров Э.Л. Ицковича, Р.Н. Каримова, Р.И. Макарова, М.И. Смирнова, В.Д. Токарева, Е.Р. Хорошевой, F. Fiorito, E.L. Grant, X. Liu, S. Karlsson, S. Wang и др.

Важный вклад в научные исследования по разработке и применению цифровых тренажеров (ЦТ) и цифровых двойников (ЦД), а также по цифровой трансформации промышленности внесли отечественные ученые: профессора А.И. Боровков, А.Ф. Егоров, В.А. Иващенко, О.М. Проталинский, А.Н. Прохоров, А.Ф. Резчиков, М.Ф. Степанов, О.И. Седяров, Т.Б. Чистякова, Е.И. Яблочников, а также зарубежные ученые M. Azango, M. Grieves, K. Hribernik, P.C. Lopez, S. Sierla, F. Tao, I. Udugama, T. Wuest, L. Zhang и др.

Методы разработки и методики применения цифровых платформ как инструментов комплексного компьютерного АУ многостадийными химическими и металлургическими производствами предложены в работах академика РАН В.П. Мешалкина, профессоров В.И. Бобкова, О.Б. Бутусова, М.И. Дли, В.М. Дозорцева, А.Ф. Егорова, В.Л. Карлинского, Е.Р. Мошева, А.И. Шинкевича и Т.Н. Юдиной, а также зарубежных ученых J. Cheng, R. Day, M. Hause, Y. Lu, D. Liu, Z. Liu, M. Matzner, E. Negri, T. Pauli, J. Tan и др.

Несмотря на многочисленные теоретико-методологические исследования по инжинирингу автоматизированных химических и металлургических производств, к сожалению, до настоящего времени не предложена общая методология автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийных ХТС, которая объединяет современные методы автоматизированного управления и многомасштабного математического моделирования ХТП с учетом особенностей цифровизации стекольной промышленности с применением инструментов «Индустрия 4.0».

Наличие широкого круга нерешенных с позиции системного анализа и методологии использования разнообразных инструментов «Индустрии 4.0» научно-исследовательских проблем по методологии разработки математического, алгоритмического и программно-информационного обеспечения АУ энергоресурсоэффективностью многостадийных производств высококачественного листового стекла обусловило постановку цели и задачи настоящего диссертационного исследования.

Цель исследования: разработка методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла на основе применения методов принятия оптимальных решений, методов многомасштабного математического и компьютерного моделирования, методов теории искусственного интеллекта, с широким использованием современных информационно-коммуникационных технологий и инструментов «Индустрия 4.0».

Для реализации поставленной цели сформулированы и решены следующие взаимосвязанные **научно-технические задачи:**

1. Выполнение системного анализа функционирования многостадийного производства высококачественного листового стекла как объекта автоматизированного управления.

2. Разработка математических и компьютерных моделей ХТП (приготовления шихты, формования ленты стекла, упаковки листов стекла) многостадийного производства ВЛС как объектов управления.

3. Разработка интеллектуально-статистического алгоритмического обеспечения автоматизированной системы (АС) диагностики точечных дефектов высококачественного листового стекла.

4. Разработка алгоритмического обеспечения иерархического АУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС как сложной химико-технологической системы.

5. Компьютерный инжиниринг пакетов прикладных программ (ППП) АУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС.

6. Разработка научно обоснованных рекомендаций по практическому применению ППП автоматизированного управления многостадийным производством ВЛС для повышения энергоресурсоэффективности конкурентных промышленных производств.

Объект исследования. Многостадийное производство высококачественного листового стекла, представляющего собой сложную

химико-технологическую систему, как объект автоматизированного управления.

Предмет исследования. Технологические схемы; показатели энергоресурсоэффективности ХТП; бизнес-процессы; технологические режимы функционирования производственных стадий сложной ХТС производства ВЛС; техническая диагностика и управление качеством выпускаемого ЛС.

Научная новизна диссертационного исследования. Получены следующие новые научно обоснованные результаты по разработке методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС:

1. Разработана нейросетевая модель АУ составом стекольной шихты, **отличающаяся** использованием многослойной искусственной нейронной сети (ИНС) с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки при автоматическом обучении, **что позволяет** обеспечить требуемый технологический режим работы дозирочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья (соответствует п. 4 области исследований).

2. Разработана математическая и компьютерная модели ХТП непрерывного формования ленты стекла, **отличающиеся** учетом влияния напряжения растягивающих усилий бортоформующих машин на поток жидкого стекла, **что позволяет** анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла на расплаве олова и создать программное обеспечение цифрового тренажера для обучения персонала работе в штатных и аварийных ситуациях (соответствует п. 4 области исследований).

3. Предложен алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов ЛС, **отличающийся** применением процедур анализа изображения ЛС на основе метода вейвлет-преобразования для локализации дефекта,

использованием искусственной нейронной сети для распознавания типа контура точечного дефекта и набора эвристических правил для классификации типа выявленного точечного дефекта, **что позволяет** автоматически формировать электронную карту дефектов ЛС, использование которой обеспечивает эффективное функционирование системы автоматического оптимального раскроя ленты стекла в реальном времени (соответствует п. 2 области исследований).

4. Предложен вероятностно-статистический алгоритм анализа этапов жизненного цикла (ЖЦ) многостадийного производства ВЛС, **отличающийся** использованием аппарата марковских процессов и графа состояний для этапов ЖЦ производства ВЛС, разработанного на **основе дополненной классификации** уровней функционирования ХТП, **что позволяет** определять вероятности нахождения производства на каждом из этапов его ЖЦ, необходимые для автоматизированного расчета показателей надежности и показателей эффективности производства ВЛС (соответствует п.7 области исследований).

5. Разработаны архитектура и режимы функционирования ППП компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, **отличающегося** использованием компьютерных моделей прогнозирования показателей эффективности ХТП и процедур определения характеристик состояния оборудования, **что обеспечивает** уменьшение количества нерациональных проектных решений, сокращение сроков проектирования и ввода в эксплуатацию АСУ производства ВЛС (соответствует п. 12 области исследований).

6. Разработана архитектура и режимы функционирования ППП диагностики точечных дефектов ЛС, **отличающегося** использованием оптико-вейвлетного метода локализации дефектов в ЛС и нейро-эвристического алгоритма классификации типов дефектов, **что позволяет** на основе применения серийных аппаратных средств обеспечить

автоматическую диагностику наиболее часто встречающихся точечных дефектов ЛС (соответствует п. 12 области исследований).

7. Разработаны архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ цифрового тренажера обучения персонала участка формования ленты стекла, **отличающегося** использованием методов системотехники для инжиниринга программного обеспечения и компьютерной модели ХТП непрерывного формования ленты стекла, **что обеспечивает** повышение квалификации рабочего персонала производства ВЛС и его обучение работе в штатных и аварийных ситуациях (соответствует п. 12 области исследований).

Теоретическая значимость работы. Развита методологическая основа автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС на основе широкого использования современных методов теории автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью сложных непрерывных производств, методов компьютерного моделирования ХТП, методов имитационного моделирования, теории искусственного интеллекта (ИИ) и инструментов «Индустрия 4.0».

Применительно к проблематике диссертации результативно, т.е. с получением новых научных результатов, использованы методология системного анализа, функционального моделирования, методы математического и компьютерного моделирования сложных ХТС, в том числе имитационного моделирования, логико-вероятностного анализа, методов вейвлет-анализа, теории ИНС, что обеспечивает достаточное научное обоснование актуальных для стекольной промышленности проектов повышения энергоресурсоэффективности в условиях цифровой трансформации обрабатывающих производств.

Разработаны математические и компьютерные модели ХТП приготовления шихты, формования ленты стекла, упаковки листов стекла, обеспечивающие повышение энергоресурсоэффективности производства ВЛС (п. 4 области исследований).

Разработано интеллектуально-статистическое алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы диагностики точечных дефектов высококачественного листового стекла (п. 2 области исследований).

Определены взаимосвязи иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью при выполнении системного анализа функционирования многостадийного производства ВЛС, что позволило реализовать вероятностно-статистический алгоритм анализа этапов жизненного цикла (ЖЦ) для автоматизированного расчета показателей надежности и алгоритм планирования выпуска партий многоассортиментного ВЛС для определения показателей эффективности многостадийного производства ВЛС (п. 7 области исследований).

Обоснованы технологии компьютерного инжиниринга пакетов прикладных программ (ППП) компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, диагностики точечных дефектов листового стекла, цифрового тренажера обучения персонала участка формования ленты стекла (п. 12 области исследований).

Практическая значимость исследования. Теоретические результаты проведенного научно-квалификационного исследования практически применены при разработке ряда проектов, при реализации мероприятий и стратегий повышения энергоресурсоэффективности как предприятий стекольной промышленности, так и ряда других непрерывных сложных многостадийных ХТС.

Прикладные исследования, разработки и расчеты выполнены с использованием достоверных данных и материалов стекольных предприятий Приволжского федерального округа. Разработаны и практически применены научно обоснованные предложения и рекомендации по инжинирингу АСУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС и по реализации цифровой трансформации с применением инструментов «Индустрия 4.0».

Результаты диссертации использованы при выполнении научно-исследовательских работ по **10-ти хозяйственным договорам с промышленными предприятиями**, в том числе:

«Разработка программного обеспечения для обучения персонала выполнению штатных операций в различных режимах при варке стекла и его формировании методом флоат-процесса и действиям по устранению нештатных ситуаций и дефектов стекла» ОАО «Саратовстройстекло» (2006); «Разработка единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло»» (2007);

«Создание программно-математического обеспечения экспериментальной системы автоматического управления» АО КБПА (2015); «Разработка концепции создания высокотехнологичного производства с применением технологий Industry 4.0 (разработка АС)» АО КБПА (2021); «Разработка организационной системы управления обслуживанием оборудования на основе системного анализа бизнес-процессов и использования отечественного программного обеспечения Business Studio» АО КБПА (2024).

Оригинальность и техническая новизна ряда предложенных в работе технологических решений защищена свидетельствами о результатах интеллектуальной деятельности.

Методология исследования основана на использовании современных методов системного анализа, методов управления ЖЦ производства, концепции комплексной автоматизации, методов инжиниринга бизнес-процессов, методов цифрового инжиниринга, методологии принятия решений, методологии инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС для научно обоснованного решения задач автоматизации многостадийных непрерывных производств сложных ХТС.

Методы (инструменты) исследования. Методы многомасштабного математического и компьютерного моделирования ХТП; методы имитационного моделирования; методы теории ИНС; инструменты

«Индустрии 4.0», алгоритмы и процедуры принятия решений по управлению ХТП и бизнес-процессами функционирования сложных ХТС для повышения энергоресурсоэффективности производства и качества готовой многоассортиментной продукции.

Методической основой исследования являются методы системного и логико-вероятностного анализа; методы анализа и оптимизации ХТС; математический аппарат марковских процессов и вейвлет-преобразований, методы ИНС, а также специальные методы синтеза организационно-технических структур производства ВЛС.

Информационную базу исследования составляют знания, изложенные в научных трудах (монографиях, научных статьях, диссертациях) отечественных и зарубежных ученых по решаемой научной проблеме; используются большие массивы статистической информации по функционированию производств ЛС; массивы данных профильных министерств и ведомств, нормативно-правовых органов, а также знания нормативно-правовых документов в области стратегии научно-технологического развития РФ, знания стратегии и программ развития обрабатывающей промышленности и программ реализации национальных проектов РФ, проектов технологического лидерства и технологического суверенитета.

На защиту выносятся следующие, имеющих научную и практическую значимость, основные результаты теоретических исследований:

1. Нейросетевая модель и алгоритм автоматизированного управления составом стекольной шихты для обеспечения заданных технологических режимов работы дозировочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья.

2. Компьютерная модель ХТП непрерывного формования ленты стекла, позволяющая анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла на расплаве олова и создать ППП для тренажеров по обучению персонала работе в штатных и аварийных ситуациях.

3. Алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов ЛС, позволяющий автоматически формировать электронную карту дефектов, используемую для эффективного функционирования системы автоматического оптимального раскроя ленты стекла в реальном времени.

4. Компьютерная имитационная модель этапов ЖЦ производства ВЛС, обеспечивающая автоматизированные расчеты показателей надежности производства ВЛС.

5. Архитектура и режимы функционирования ППП компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, который обеспечивает сокращение числа необоснованных проектных решений, времени проектирования и ввода в эксплуатацию АСУ ТП производства ВЛС.

6. Архитектура и режимы функционирования ППП диагностики точечных дефектов ЛС, обеспечивающего автоматическую диагностику наиболее часто встречающихся точечных дефектов ЛС.

7. Архитектура и режимы функционирования ППП цифрового тренажера обучения персонала ХТП формования ленты стекла, обеспечивающего повышение квалификации персонала и обучение работе в штатных и аварийных ситуациях производства ВЛС.

8. Научно обоснованные инженерно-технологические рекомендации по практическому использованию разработанных ППП для автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС.

Обоснованность научных результатов диссертационной работы подтверждается использованием общепринятых апробированных научных положений, методологии системного анализа, научных методов экспериментальных исследований; применением методов системного анализа, методов имитационного моделирования, методов теории анализа и оптимизации ХТС, методов системной динамики; подтверждается согласованностью полученных новых научных результатов с известными теоретическими положениями.

Достоверность полученных автором новых теоретических научно-исследовательских результатов, научных положений, выводов и научно-технологических рекомендаций подтверждается совпадением полученных результатов многочисленных вычислительных экспериментов с достоверными экспериментальными данными.

Научные и практические результаты диссертационной работы не противоречат полученным ранее известным научно-техническим результатам других авторов в области методологии системного анализа, повышения энергоресурсоэффективности сложных ХТС и компьютерного инжиниринга АСУ многостадийными производствами.

Для сбора и обработки технологической, производственной и бизнес-информации о функционировании предприятий стекольной промышленности Приволжского федерального округа применены современные вероятностно-статистические методы накопления и обработки больших массивов данных.

Апробация работы. Результаты научно-квалификационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на следующих основных научно-технических международных и всероссийских конференциях:

«Международный год стекла в России» (Санкт-Петербург, 2022); **«Неорганическая химия - фундаментальная основа в материаловедении керамических, стеклообразных и композиционных материалов»** (Санкт-Петербург, 2016); **«Российская мультikonференция по проблемам управления»** (Санкт-Петербург, 2008); **«Математические методы в технике и технологиях – ММТТ»** (Псков, 2009; Волгоград, 2012; Нижний Новгород, 2013, 2023; Тамбов, 2014; Ярославль, 2015 , 2022; Санкт-Петербург, 2017, 2021; Казань, 2024; Самара, 2025); **«Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности – ЛЭРЭП»** (Смоленск, 2015); **«Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности»** (Москва, 2013); **«International Congress on Information Technologies»** (Саратов, 2012, 2016); **«Компьютерные науки и информационные технологии»** (Саратов, 2021); **«Имитационное**

моделирование – ИММОД» (Казань, 2023), «Кибер-физические системы: проектирование и моделирование» (Ярославль, 2022); «Системный анализ, управление и навигация» (Евпатория, 2023) и др.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в международные базы цитирования «Web of Science» и «Scopus» и рекомендованных **ВАК РФ по специальности 2.3.3.**

Научные положения и ряд основных научно-практических результатов, полученные автором, использованы при выполнении **Институтом проблем точной механики и управления РАН государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 007-00275-18-00 «Разработка моделей и методов анализа функционирования сложных человеко-машинных систем в критических ситуациях» и № FFNM-2022-0010 «Разработка интеллектуальных моделей и методов управления сложными человеко-машинными системами в условиях критических ситуаций».**

Основные результаты диссертации использованы в учебно-методической работе в ряде университетов при разработке:

- **авторских учебных курсов** повышения квалификации работников промышленных предприятий «Разработка бизнес-процессов промышленного предприятия с использованием программного обеспечения Business Studio», «Проектирование АСУТП», «Чертежник-конструктор робототехнических систем» в СГУ им. Н.Г. Чернышевского;
- **учебных дисциплин** «Тепломассообменное оборудование предприятий» и «Цифровые двойники объектов теплоэнергетики» по основным образовательным программам по направлениям: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»;
- **программ учебных дисциплин:** «АСУ», «Основы проектирования систем», «Имитационное моделирование систем» по направлениям: **09.04.01**

«Информатика и вычислительная техника», **27.03.03** «Системный анализ и управление» кафедры «Системный анализ и автоматическое управление» СГУ им. Н.Г. Чернышевского.

Результаты научно-квалификационной работы использованы **при совершенствовании организационно-управленческой деятельности** ряда промышленных организаций: ОА «Саратовстройстекло», ОА «Саратовский институт стекла», АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», а также в образовательной деятельности ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», что подтверждено соответствующими справками (см. Приложение диссертации).

Некоторые основные результаты диссертационной работы зарегистрированы в виде электронного ресурса [27] и программ для ЭВМ [23 – 26].

Публикации. По теме диссертации опубликовано **124 научных работы** общим объемом **38,15 п.л.** (личный авторский вклад **23,72 п.л.**).

Основные положения диссертации получили полное отражение в 23 статьях, из них 5 статей – в изданиях, индексируемых в международной базе научного цитирования Scopus. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и свидетельство на полезную модель. Опубликовано коллективная монография.

Личный вклад автора при подготовке публикаций. Выполнен системный анализ производства ВЛС как сложной ХТС [300, 334, 422, 448, 453, 465, 474, 486, 489, 492, 499, 500, 501, 502]; разработаны математические модели, алгоритмы;

разработана процедура и программно-информационное обеспечение для автоматизации диагностики дефектов ЛС [390, 402, 473, 472, 490, 495];

разработаны компьютерные модели основных ХТП: приготовления шихты [343, 493, 496], формования ленты стекла, дополняющая известные модели [485, 494];

разработаны математические модели и алгоритмы для автоматизации контроля качества стекольной шихты [496];

разработано методическое обеспечение автоматизированного инжиниринга пакетов прикладных программ АСУ многостадийными непрерывными производствами [465], разработана модель состояний этапов ЖЦ непрерывного производства [417, 445] и алгоритм анализ показателей надежности производства листового стекла [331];

разработаны компьютерные модели производства ВЛС [491, 447, 450, 487] и упаковки листов стекла [379, 483, 488, 503] на основе анализа мехатронных систем [452, 454, 484, 497];

разработаны архитектура и режимы функционирования ППП: компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС [465, 498]; диагностики точечных дефектов ЛС [390, 490]; цифрового тренажера обучения операторов цеха формования ВЛС [474, 485].

Структура, логика, содержание и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы; 3 приложений.

Объем диссертации 420 страницы, включая 99 рисунков, 11 таблиц, 3 приложения. Библиографический список включает 503 источника.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

1.1. Современное состояние научных исследований по системному подходу к повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных непрерывных промышленных производств

Современные производства химического, нефтегазохимического, нефтеперерабатывающего комплексов, металлургические производства, производство стекла и различных строительных материалов представляют собой сложные технологические системы. Для решения задач анализа и оптимизации показателей энергоресурсоэффективности и экологической безопасности, указанных технологических систем, необходимо использовать методологию системного подхода.

В РХТУ имени Д. И. Менделеева под научным руководством академика РАН Мешалкина В.П. более 30 лет активно проводятся передовые научные исследования по интенсификации, энергоресурсоэффективности, обеспечению надёжности и экологической безопасности цифровизированных сложных химико-технологических систем, соответствующих производствам химического, нефтегазохимического и металлургического комплекса [1-3], которые основываются на оригинальных разработках в области системного анализа [4], математического моделирования [5], цифровизации [6], многокритериальной оптимизации энергоресурсо-эффективности [7, 8] химико-технологических процессов.

Основные методы и инструменты системного анализа при решении задач проектирования организационно-технических систем предложены в работах отечественных ученых: академиков АН СССР Глушкова В.М., Кафарова В.В. [1, 9], Марчука Г.И [10], академиков РАН Васильева Ю.С. [11], Васильева С.Н. [12], Новикова Д.А. [13], Макарова В.Л. [14], Мешалкина В.П. [4], Саркисова П.Д. [15], академика АН Грузии Прангишвили И.В. [16], член-корреспондента РАН Махутова Н. А. [17], член-корреспондента Резчикова

А.Ф. [18], профессоров Большакова А.А. [19], Бобкова В.И.[20], Васильева Е.М.[21], Глебова М.Б [22], Дорохова И.Н. [9], Егорова А.Ф. [23], Ицковича Э.Л. [24], Козлова В.Н. [25], Кольцовой Э.М. [26], Литовко Ю.В. [27], Лившица М.Ю. [28], Макаров Р.И. [29], Меньшутинной Н.В. [30], Мошева Е.Р. [6], Пащенко Ф. Ф. [31], Спирина Н.А. [32], Твердохлебова Хорошевой Е.Р.[28], Чистяковой Т.Б.[33] и Шинкевича А.И.[34], а также зарубежных ученых: K.L.Bertalanffy, B.Dwyer [35], B. Chen[36], J.O. Grady [37], J.C. Principe[38], H. Krallmann [39], G.Stephanopoulos [39], V.Venkatasubramanian [40], A.W. Westerberg [41], J.L. Whitten [42], S.Young [43] и др.

Насущные потребности современной науки, техники, практической деятельности в целом настоятельно выдвигают задачу разработки системного подхода к исследованию любых явлений и процессов окружающего нас мира [44, 45]. В зависимости от уровня рассмотрения большинство процессов реального мира относится к структурно-сложным системам, которые при математическом описании не сводятся к последовательным, параллельным или древовидным структурам [44, 46]. Системный подход является основой таких научных направлений, как общая теория систем, системный анализ, системотехника, которые обеспечивают исследование сложных систем.

Принципы и методы системного подхода конкретизирует общая теория систем, которая представляет собой научную и методологическую концепцию исследования объектов, представляющих собой системы [47, 48]. Общая теория систем включает теоретические методы: теория информации, теория вероятностей, теория игр и др..

Системный подход и общая теория систем обеспечивают теоретическую и методологическую основу системного анализа [49], который обеспечивает методологические и практические аспекты исследования сложных систем с применением практических методов: исследование операций, математическая статистика, имитационное моделирование и др. Системный анализ решает основные задачи математического моделирования по разбиению изучаемой системы на отдельные элементы, установлению

связей между ними в виде математических зависимостей [50]. Системный анализ включает следующие основные этапы: 1) постановка задачи управления для решения проблемы, в рамках которой определяются объект исследования, цели и критерии для изучения объекта и управления им; 2) определение структуры и границ изучаемой системы; 3) разработка математической модели изучаемой системы, в рамках которой определяются элементы системы, элементарные воздействия на систему с помощью параметров и задание области определения каждого параметра; 4) исследование адекватности математической модели и прогнозирование развития сложной системы [51].

Системотехника на основе методологии системного анализа обеспечивает решение практических задач декомпозиции структурно-сложных систем и синтеза программно-информационного обеспечения их автоматизированных систем управления [52, 53].

Термин «системный анализ» авторы [51, 54] используют для исследований объектов управления категории «Система». Процедура проведения исследования объектов управления характеризуется термином «Анализ», которая состоит в разбиении проблемы на ее составляющие части с учетом их основных взаимосвязей. Части проблемы более доступны для их решения с использованием известных методов математического моделирования [55]. Частные решения подпроблем объединяются для получения общего решения проблемы. Использование методов системного анализа обусловлено тем, что в процессе принятия решений осуществляется выбор оптимального варианта в условиях неопределенности, которая связана с наличием факторов, не поддающихся строгой количественной оценке. Процедуры и методы системного анализа направлены именно на выдвижение альтернативных вариантов решения проблемы, выявление масштабов неопределенности по каждому из вариантов и сопоставление вариантов по тем или иным критериям эффективности [56 – 58]. Вопросы оптимизации полученных решений рассмотрены в работах [59 – 61].

Основной задачей системного анализа является построение комплексной модели, отображающей все основные для исследуемого объекта факторы и взаимосвязи, которые могут проявиться в реальной ситуации и повлиять на процесс нахождения решения. Полученная модель исследуется с целью выяснения степени адекватности результата моделирования статистическим данным функционирования сложной системы. Затем проводится прогнозирование функционирования сложной системы при различных исходных данных. Проводится сравнение затрат ресурсов по каждому из вариантов и определяется степень чувствительности модели к различным нежелательным внешним воздействиям [62, 63]. Методы системного анализа позволяют определять условия устойчивого функционирования автоматизированных систем управления, установить влияние параметров системы на ее устойчивость, обеспечивая заданный режим работы [64 – 66]. Результаты системного анализа объекта управления являются основой для создания систем автоматического управления [67] и технической диагностики [68, 69].

В области научных исследований по химической технологии новым направлением является инжиниринг химико-технологических систем (ХТС). Основоположником его является профессор Roger W.H. Sargent (Imperial College, London) [66]. Инжиниринг химико-технологических систем (ХТС) использует результаты научных исследований по типовым процессам химической технологии и аппаратам (оборудованию) химических производств.

Важный вклад в разработку методов математического моделирования технических систем и автоматизированных промышленных производств внесли советские и российские ученые: академик АН СССР В.В. Кафаров [70] и академик АН СССР Н.Е. Кочин [71], академик РАН В.В. Окрепилов [72] и академик РАН В.Л. Макаров [72, 73], член-корреспондент АН СССР Н.П. Бусленко [74], профессора А.А. Большаков [19, 75],

А.М. Бессарабов [76], Е.М. Васильев [21], В.А. Иващенко [77], В.А.Коваль [78], Н.Н. Макеев [79], Э.Я. Рапопорт [80] и др.

Повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных непрерывных промышленных производств, в т.ч. ХТП производства ЛС, на основе системного подхода и математического моделирования посвящены многочисленные работы российских и зарубежных ученых академиков РАН В.П. Мешалкина [3], П.Д.Саркисова [15]; профессоров Т.А. Барбасовой [81], В.И. Бобкова [20], Л.С. Казаринова [82, 83], Р.И. Макарова [29], О.И. Седярова [84], Н.А. Спирина [32], Е.Р. Хорошевой [85], Т.Б. Чистяковой [33] и зарубежных ученых Reaney I.M. [86], Kim J. [87], Chen Z. [88] и др. .

В работе [3] рассмотрены основные виды и направления техники, методов и приемов интенсификации химико-технологических систем (ХТС) и технологической оптимизации энерго- и ресурсоэффективных процессов. Также в работе рассмотрены: методы комплексной оценки энергоэффективности производства и программно-информационного обеспечения автоматизированного синтеза оптимальных энергоэффективных систем регенеративного теплообмена с использованием пинч-анализа; методы и алгоритмы фрактально-статистического анализа характеристик нестационарных течений газа в сложных газопроводах; инфраструктурные цепочки поставок; организация и логистическое управление инжинирингом бизнес-процессов для повышения энергоэффективности предприятий. Выполнен анализ разработки проблемно-ориентированных компьютерных систем, эвристико-вычислительных моделей и алгоритмов интеллектуальной комплексной логистической поддержки жизненного цикла оборудования; инженерных разработок в области цифровой трансформации химических производств; применения методов оптимизации коэффициентов надежности, цифровизации управления рисками и безопасностью при проектировании энерго- и ресурсоэффективных ХТС.

Повышение эффективности использования энергии, материалов и ресурсов может принести множество желаемых преимуществ, таких как

экономия затрат, повышение энергетической и ресурсной безопасности и производительности [87, 88]. В работе [87] рассматриваются экономические, организационные и поведенческие проблемы, влияющие на внедрение энергоресурсоэффективных технологий на основе социально-технического подхода ко всей производственной цепочке поставок, а также классы сырья, предварительная обработка, производство, отходы и вторичная переработка. В работе показано [89], что, в отличие от простых подходов по снижению энергоемкости, которые теперь вызывают проблемы, применение более сложных или дорогостоящих технологий позволяет предприятиям химической промышленности получить большие экологические и энергетические преимущества, но требуют передовых технологий или менеджмента для реализации.

В работах [33, 89 – 91] рассматриваются методы повышения энергоресурсосбережения на металлургических предприятиях. В работе [89] рассмотрены вопросы повышения эффективности использования энергетических ресурсов обеспечения технологических потребителей, а также вопросы управления режимами технологического пароснабжения и потребления энергетических ресурсов. В статье [33] предложена функциональная структура компьютерной системы, позволяющей на основе интеллектуального анализа промышленных данных и мониторинга трендов основных параметров сталеплавильного процесса осуществлять контроль шлакового режима конвертерной плавки стали.

В работах [75, 92] рассмотрено формирование оптимального производственного расписания плана производства, которое позволяет более равномерно распределить нагрузку на обрабатывающие комплексы, существенно улучшить энергоресурсоэффективность работы предприятия. Оптимальный план положительно влияет на следующие аспекты: улучшение логистических показателей складских структур; энергопотребление; оперативное изменение планируемых заданий для оборудования при организации и проведении ремонтных процедур [75].

Вопросы по системному подходу к повышению энергоресурсоэффективности производства листового стекла рассмотрены в работах [93 – 95]. Особенностью производства листового стекла является сложная взаимосвязь между энергетикой (энергопотреблением) и технологией, где на энергопотребление влияет не только фактор производственной загрузки, но и иные, как внутренние, так и внешние, воздействующие факторы. В работе [94] разработан метод оценки регулировочной способности по энергоэффективности предприятия по выпуску листового стекла, эксплуатирующего газовую печь регенеративного типа. В работе [96] предложена методика оценки эффективности внедряемых мероприятий по энергосбережению на предприятии стекольной промышленности.

Важную роль в распространении знаний в области системного анализа автоматизированных систем управления сложными кибер-физическими системами обеспечивают международные научно-практические конференции «Математические методы в технике и технологиях» (организованную в 1973 г. Академиком РАН Марчуком Г.И.) [97 – 100], «Системный анализ, управление и навигация» (ежегодно проводится с 1996 г.) [101, 102], «Кибер-физические системы» (ежегодно проводится с 2019г.) [103 – 106] и др.

Разработка многоуровневых автоматизированных систем управления энергоресурсоэффективностью и экологической безопасностью сложных технологических систем и химико-технологических систем, выпускающих высококачественную продукцию, представляет собой сложную научно-техническую проблему. Для химико-технологических систем ее решение основано на использовании методологии системного подхода, методах и инструментах теории систем, системного анализа и системотехники. Решение проблемы повышения энергоресурсоэффективности автоматизированных непрерывных химико-технологических промышленных производств имеет важное социально-экономическое значение.

1.2. Краткая характеристика современных автоматизированных систем иерархического управления непрерывными промышленными производствами высококачественной продукции

Теоретические основы, заложенные более 40 лет назад ведущими зарубежными и отечественными учеными, не потеряли свою актуальность и находят практическое применение при создании высокотехнологичных цифровизированных наукоемких производств в химической и смежных отраслях промышленности на основе автоматизированных систем многоуровневого управления непрерывными производствами и базовых положений Индустрии 4.0 [107 – 109].

Проблема использования цифровых платформ как инструмента комплексного компьютерного управления автоматизированными многостадийными химическими и металлургическими производствами нашла отражение в работах М.И. Дли, В.М. Дозорцева, В.Л. Карлинского, академика РАН В.П. Мешалкин, Е.Р. Мошева, А.И. Шинкевича, Т.Н. Юдиной, J. Cheng, R. Day, M. Hause, Y. Lu, D. Liu, Z. Liu, M. Matzner, E. Negri, T. Pauli, J. Tan и др.

Современные автоматизированные системы многоуровневого управления непрерывными производства представляют собой сложные иерархические человеко-машинные системы, включающие следующие виды обеспечений: информационное, программное, техническое, организационное, метрологическое, правовое и лингвистическое [110, 111]. Ввод в действие АСУ должен способствовать достижению технико-экономических, социальных или других результатов: 1) снижению численности управленческого персонала; 2) повышению качества функционирования объекта управления; 3) повышению качества управления, 4) повышению производительности труда; 5) повышению качества продукции; 6) снижению себестоимости продукции; 7) увеличению межремонтных периодов и др. [112].

Многоуровневые автоматизированные системы управления непрерывными производствами разделяют на иерархические уровни: ОАСУ — отраслевая автоматизированная система управления (Corporate Performance Management (CPM)); АСУП — автоматизированная система управления предприятием (Enterprise Resource Planning (ERP)); АСУПП — автоматизированная система управления производственными процессами (Manufacturing Execution Systems (MES)); АСУ ТП — автоматизированные системы управления технологическими процессами (Industrial Control System (ICS)) [111, 113 – 117].

Информационный разрыв между системами АСУП, автоматизирующих стратегический уровень управления производством, и АСУТП, которые ориентированы на оперативное управление производством, закрывают автоматизированные системы управления производственными процессами (АСУПП) или MES-системы. Они в режиме реального времени отслеживают выполнение производственных процессов создания продукции, контроль состояния оборудования и распределения ресурсов, оперативное планирование, диспетчеризацию производства, управление производственным персоналом, качеством продукции, производственными процессами и фондами, установление связей между персоналом и оборудованием, между производством и поставщиками, потребителями, работниками и др. [116, 117]. Для обеспечения возможности взаимодействия АСУП (ERP-систем) и АСУПП (MES-систем) в США и ЕС и приняты стандарты ISA 95 и IEC 62264 соответственно [118 – 121].

По стандарту ISA_95, любая MES-система должна быть в состоянии отвечать на следующие вопросы: 1) как производить? (определение как делать продукт); 2) что может быть произведено? (определение доступных ресурсов); 3) когда и что производить? (определение расписания); 4) когда и что было произведено? (определение производительности) [122 – 125].

Благодаря этому разбиению, можно детально описать основные производственные и бизнес-процессы, связанные с решением MES задач.

Каждый овал на рисунке 1.1 представляет набор действий, выполняющихся на производстве в ответ на требования уровня бизнес-управления [123, 124]. В той или иной мере эту функциональность реализуют модули, входящие в состав современных программных продуктов класса MES: OPCenter компании Siemens, AVEVA MES компании Wonderware, SAP MES компании SAP, 1C MES и др. [119]. Компания Siemens называет Siemens Opcenter не MES – системой, а MOM (менеджер производственных операций), подчеркивая его сосредоточенность на производственных процессах.

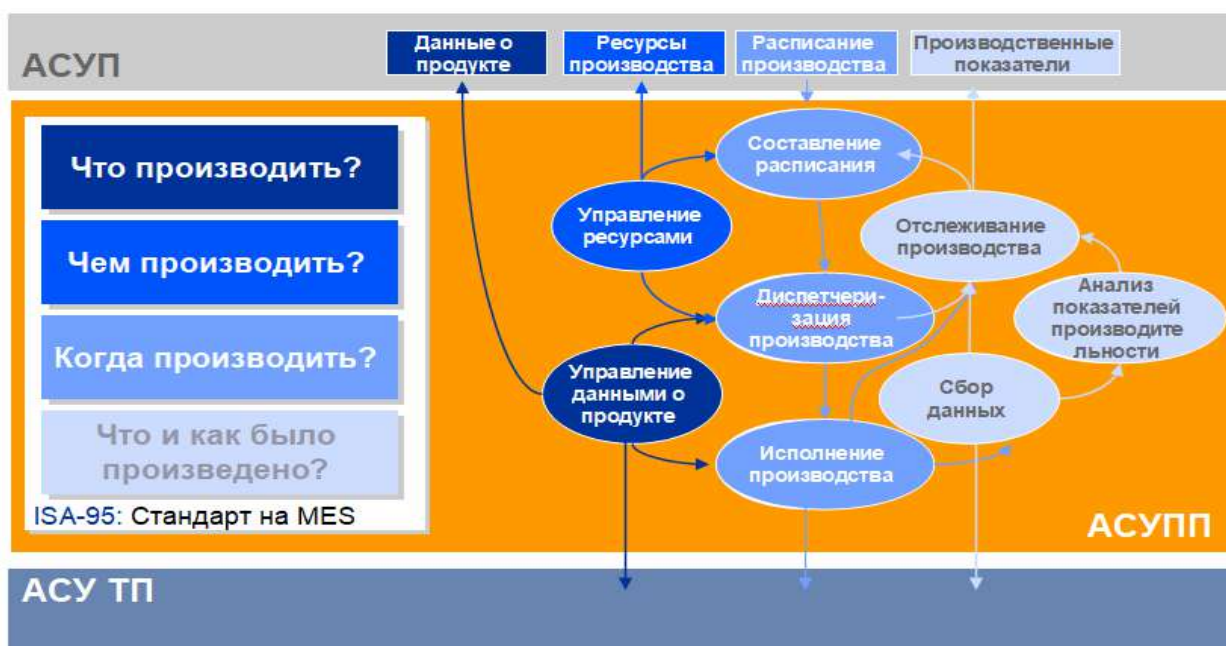


Рисунок 1.1 - Стандарт ISA95 и уровни автоматизированного управления производственными процессами [123]

Ускорение процессов проектирования и продолжительности внедрения проектов реконструкции существующих и разработки новых ХТС обеспечивают системы автоматизированного проектирования (САПР), включающие подсистемы: CAD (Computer Aided Design — компьютерная поддержка конструирования изделий) для объемного моделирования, оценки проектных решений, получения чертежей и конструкторской документации; CAE (Computer Aided Engineering — компьютерная поддержка инженерного анализа) для анализа, моделирования и оптимизации функций проектируемых устройств и их элементов; CAM (Computer Aided Manufacturing —

компьютерная поддержка изготовления) для технологической подготовки производства и разработки технологических процессов, программ для станков с числовым программным управлением, моделирования процессов обработки деталей, разработки документации для их изготовления; PDM (Product Data Management — системы управления проектными данными об изделиях) для коллективного проектирования [115].

САПР является важной составляющей компьютерно-интегрированного производства. При создании компьютерно-интегрированного производства (Computer-integrated manufacturing (CIM)) необходимо обеспечить объединение и синхронизацию в единой информационной системе потоков данных от промышленных контроллеров, рабочих станций, автоматизированных рабочих мест и других источников информации. CIM-системы довольно сложны из-за их физических размеров, многообразия задач и большого количества взаимосвязанных устройств обработки данных. Подход к CIM-системам и их анализ требуют различных взглядов с разных исходных точек. Функциональный взгляд на компьютерно-интегрированное производство показан на рисунке 1.2 [116].

АСУ в необходимых объемах должна автоматизированно выполнять следующие основные функции: 1) сбор, обработку и анализ информации (сигналов, сообщений, документов и т.п.) о состоянии объекта управления; 2) выработку управляющих воздействий (программ, планов и т.п.); 3) передачу управляющих воздействий (сигналов, указаний, документов) на исполнение и ее контроль; 4) реализацию и контроль выполнения управляющих воздействий; 5) обмен информацией (документами, сообщениями и т.п.) с взаимосвязанными автоматизированными системами; 6) планирование, 7) прогнозирование; 8) координация, 9) регулирование [110, 112]. Дополнительно АСУ ТП должна обеспечивать управление объектом в нормальных, переходных и предаварийных условиях его функционирования, а также защиту или остановку объекта при угрозе аварии [110].

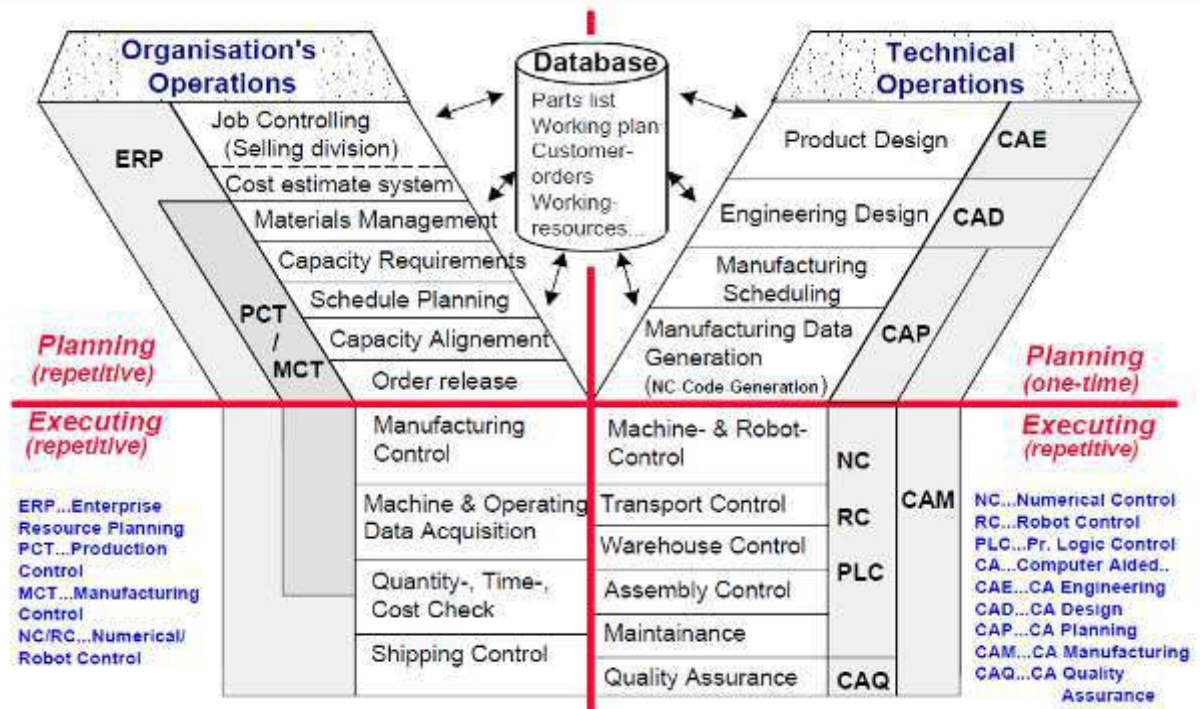


Fig. 1.1-5 Computer integrated manufacturing - functional view

Рисунок 1.2 - Функциональный взгляд на компьютерно-интегрированное производство [116]

Оригинальное слово	Перевод на русский язык
Organisation's Operations	Операции организации
Job Controlling (Selling division)	Контроль работ (отдел продаж)
Cost estimate system	Система оценки затрат
Materials Management	Управление материалами
Capacity Requirements	Требования к мощности
Schedule Planning	Планирование графика
Capacity Alignment	Сопоставление мощности
Order release	Выпуск заказа
Manufacturing Control	Контроль производства
Machine & Operating	Оборудование и эксплуатация
Data Acquisition	Сбор данных
Quantity-, Time-, Cost Check	Проверка количества, времени, затрат
Shipping Control	Контроль отгрузки
ERP...Enterprise Resource Planning	Планирование ресурсов предприятия (ERP)

PCT...Production Control	Контроль производства (PCT)
MCT...Manufacturing Control	Контроль изготовления (MCT)
NC/RC...Numerical/Robot Control	Числовое/роботизированное управление (NC/RC)
Database	База данных
Parts list	Список деталей
Working plan	План работы
Customer orders	Заказы клиентов
Working resources	Рабочие ресурсы
Technical Operations	Технические операции
Product Design	Проектирование продукта
Engineering Design	Инженерное проектирование
Manufacturing Scheduling	Планирование производства
Manufacturing Data Generation (NC-Code-Generation)	Генерация данных производства
Machine- & Robot- Control	Управление оборудованием и роботами
Warehouse Control	Контроль склада
Transport Control	Контроль транспорта
Assembly Control	Контроль сборки
Maintainance	Обслуживание
Quality Assurance	Обеспечение качества
NC...Numerical Control	Числовое управление (NC)
RC...Robot Control	Роботизированное управление (RC)
PLC...Program Logic Control	Программное логическое управление (PLC)
CA...Computer Aided	Компьютерное обеспечение (CA)
CAE...CA Engineering	Инженерное обеспечение (CAE)
CAD...CA Design	Проектирование с помощью компьютера (CAD)
CAP...CA Planning	Планирование с помощью компьютера (CAP)
CAM...CA Manufacturing	Производство с помощью компьютера (CAM)
CAQ...CA Quality Assurance	Обеспечение качества с помощью компьютера (CAQ)
Planning (one-time)	Планирование (однократное)
Planning (repetitive)	Планирование (повторяющееся)
Executing (repetitive)	Выполнение (повторяющееся)

Fig. 1.1-5 Computer integrated manufacturing functional view	Рис. 1.1-5 Функциональный вид компьютерно-интегрированного производства

Техническое обеспечение АСУ включает следующее основное оборудование: датчики технологических параметров, исполнительные устройства (частотные преобразователи, позиционеры, реле, клапаны и др.), программируемые логические контроллеры, промышленные сети, промышленные компьютеры, серверы, сетевые коммутаторы, маршрутизаторы, структурированные кабельные системы, рабочие станции, персональные компьютеры, различное периферийное оборудование, системы технического зрения и др. [114]. Комплексную поставку оборудования для многоуровневой автоматизации промышленных производств могут обеспечить компании: Siemens [126], Allen Bradley, Emerson, Honeywell, Yokogawa, НПФ «Круг» и др.

На рисунке 1.3 представлена архитектура технического и программного обеспечения компании Siemens.

В области автоматизации технологических процессов часть производителей сосредоточилась на производстве программируемых логических контроллеров, датчиков и исполнительных устройств, к ним относятся компании: «Производственное объединение ОВЕН» [127], ООО «ПРОСОФТ» [128], Advantech [129] и др. Средства для разработки программного обеспечения АСУТП предоставляют компании: CODESYS Group [130], Master SCADA [131], ООО Адастра [132] и др. Архитектура технического и программного обеспечения Trace Mode 7.1 компании ООО АдАстра показана на рисунке 1.4.

Все программы TRACE MODE 7.1 сделаны как нативные приложения Линукс и Windows и не используют фреймворки-посредники иностранного производства (такие как .NET, WINE, JRE, JSRE, CLR, MONO и т.д.), что обеспечивает высокую скорость, компактность и надежность SCADA TRACE MODE 7.

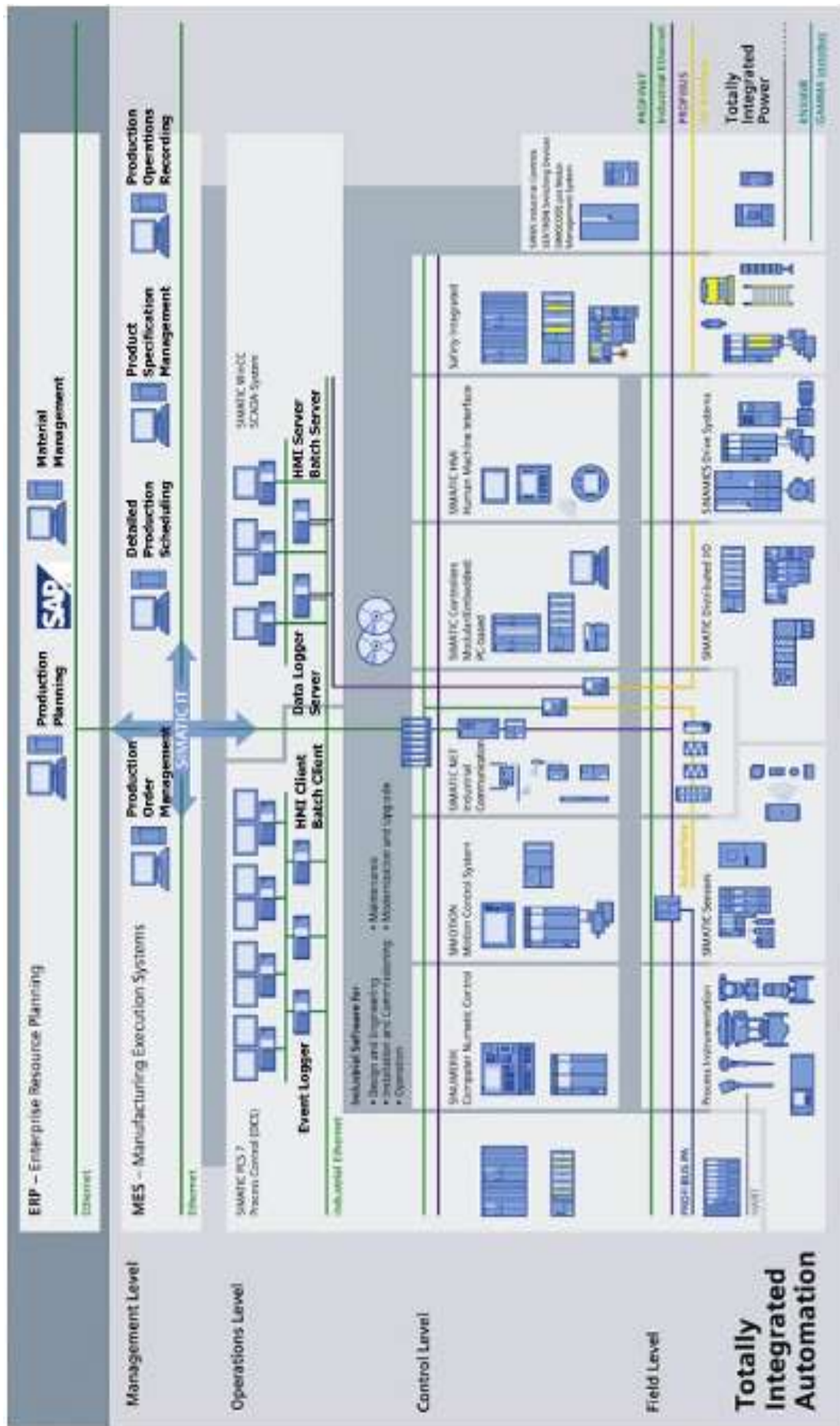


Рисунок 1.3 - Архитектура технического и программного обеспечения компании Siemens [126]

Оригинальное слово	Перевод на русский язык
ERP - Enterprise Resource Planning	ERP - Планирование ресурсов предприятия
Ethernet	Ethernet
Production Planning (SAP)	Планирование производства (SAP)
Material Management	Управление материалами
Management Level	Уровень управления
MES - Manufacturing Execution Systems	MES - Системы управления производством
Production Order Management	Управление производственными заказами
Detailed Production Scheduling	Детальное планирование производства
Product Specification Management	Управление спецификациями продукта
Production Operations Recording	Запись производственных операций
Operations Level	Уровень операций
SIMATIC PCS 7 Process Control (DCS)	SIMATIC PCS 7 Управление процессами (DCS)
Event Logger	Журнал событий
HMI Client	Клиент HMI
Batch Client	Клиент пакетной обработки
Data Logger Server	Сервер журнала данных
SIMATIC WinCC SCADA System	SIMATIC WinCC Система SCADA
HMI Server	Сервер HMI
Batch Server	Сервер пакетной обработки
Control Level	Уровень управления
Industrial Ethernet	Промышленный Ethernet
Industrial Software for: Design and Engineering, Installation and Commissioning, Operation, Maintenance, Modernization and Upgrade	Промышленное программное обеспечение для: проектирования и инжиниринга, установки и ввода в эксплуатацию, эксплуатации, обслуживания, модернизации и апгрейда
Safety Integrated	Интегрированная безопасность
SINUMERIK - Computer Numeric Control	SINUMERIK - Численное управление
SIMOTION - Motion Control System	SIMOTION - Система управления движением

SIMATIC NET - Industrial Communication	SIMATIC NET - Промышленная связь
SIMATIC Controllers - Modular/Embedded/PC-based	SIMATIC Контроллеры - Модульные/Встроенные/На основе ПК
SIMATIC HMI - Human Machine Interface	SIMATIC HMI - Интерфейс человек-машина
SENTRON - Switching Devices	SENTRON - Коммутационные устройства
SINAMICS - Drive Systems	SINAMICS - Системы управления приводами
SIMOCODE pro - Motor Managment System	SIMOCODE pro - Система управления двигателями
SIRUS - Industrial Controls	SIRUS - Промышленные контроллеры
Field Level	Уровень поля
Process Instrumentation	Инструментация процессов
PROFINET	PROFINET
PROFIBUS	PROFIBUS
AS-Interface	AS-Interface
Totally Integrated Power	Полностью интегрированная мощность
KNX/EIB	KNX/EIB
Gamma Instobus	Gamma Instobus
SIMATIC Sensors	SIMATIC Датчики
SINAMICS Drive Systems	SINAMICS Системы управления приводами
SIMATIC Distributed I/O	SIMATIC Распределенный ввод-вывод
Totally Integrated Automation	Полностью интегрированная автоматизация

Современный уровень развития технологий автоматизации производств создал условия для появления концепции четвертой промышленной революции - Industry 4.0. Концепция Industry 4.0 разрабатывалась с 2006 года в рамках государственной Hi-Tech стратегии правительства Германии как один из десяти проектов, направленных на изменение тенденции экономического кризиса 2008-2009 гг. по реиндустриализации Германии. Концепция была представлена в 2011 году на Ганноверской выставке авторами Кагерманн Х., Лукас В., Вальстер В. - представителями бизнеса, политики и науки [134]. Концепция Industry 4.0. была поддержана ведущими немецкими предпринимательскими союзами [135].

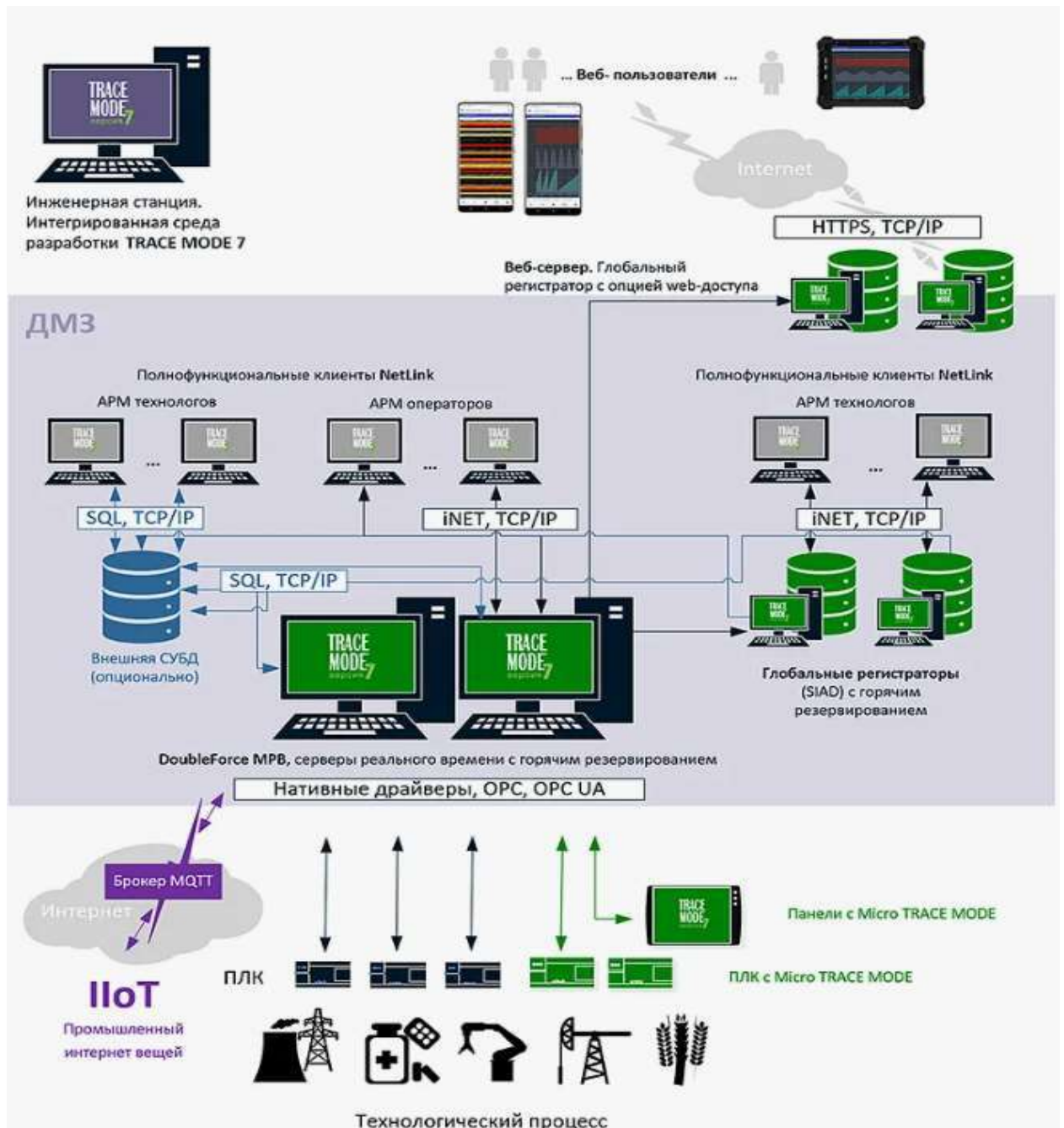


Рисунок 1.4 - Архитектура технического и программного обеспечения Trace Mode 7.1 компании АдАстра [103]

Основой Industry 4.0. являются современные технологии автоматизации производств, которые обеспечивают функционирование «киберфизических систем» (CPS), объединяющих вычислительные и физические операционные процессы предприятий. Реализация концепции Industry 4.0. на предприятиях - это переход к парадигме интеллектуального производства с многомасштабным динамическим моделированием, симуляцией и

интеллектуальным принятием решений для расширения производственных возможностей [136, 137].

В концепции «Индустрия 4.0» нет ничего действительно нового или уникального [138]. Это просто последняя из серии инициатив, которые продвигают отрасль в направлении большей интеграции:

1. Цифровое производство (1970-е),
2. Компьютерно-интегрированное производство (СІМ) (1990-е),
3. Цифровая фабрика (~2000),
4. Фабрика 2.0 (2005 г.),
5. Интеллектуальная фабрика (2007 г.),
6. Индустрия 4.0 (2011 г.).

Индустрия 4.0 разделяет многие концепции компьютерно-интегрированного производства, но делает упор на децентрализованные и в значительной степени автономные системы с общими интерфейсами передачи данных. Для Индустрии 4.0 ключевым требованием является необходимость непрерывного и автоматического обмена данными в режиме реального времени во всех системах. Выделяют три основных характеристики Индустрии 4.0:

1. Горизонтальная интеграция через сети создания ценности, которая описывает, как различные участники цепочки создания стоимости сотрудничают и взаимодействуют друг с другом;
2. Сквозная цифровая интеграция инженерных решений по всей цепочке создания стоимости, которая включает в себя использование цифровых моделей от разработки концепции продукта до проектирования производственных систем, производства и обслуживания;
3. Вертикальная интеграция и сетевые производственные системы, которые предполагают создание гибких, реконфигурируемых и децентрализованных производственных систем [138].

Концепция "Индустрия 4.0" предназначена для создания правил цифрового описания для технического объекта и изменения его состояния на

протяжении всего его жизненного цикла в виде модели эталонной архитектуры Индустрии 4.0 "RAMI4.0". Цель этой модели - представить технический объект и все аспекты, относящиеся к нему, от его разработки, производства и использования вплоть до его утилизации. Компонент Индустрии 4.0 обеспечивает цифровое описание объекта, что позволяет виртуально представлять этот объект. ГОСТ Р 59799-2021 «Национальный стандарт Российской Федерации «Умное производство модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0))» [139, 140] определяет концепцию «технического актива», модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 «RAMI4.0» (рисунок 1.5.) и эталонную модель компонента Индустрии 4.0. Эталонная модель компонента Индустрии 4.0 состоит из административной оболочки и технического актива с цифровой связью в системе Индустрии 4.0 и обеспечивает услуги с определенными свойствами качества обслуживания (QoS) [140].

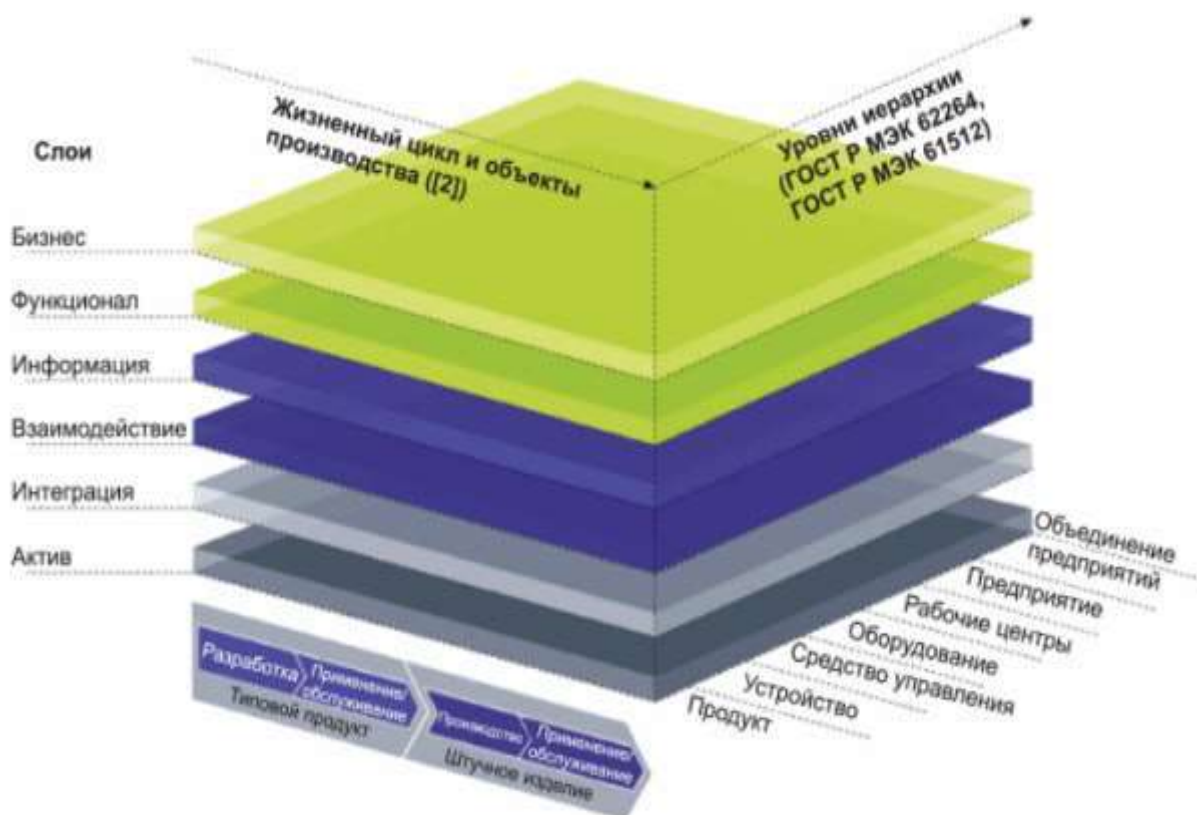


Рисунок 1.5 - Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0)

Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI4.0) обеспечивает структурированное представление. Основные элементы активов представлены в трехкоординатном отображении, как показано на рисунке 1.5. Это позволяет показать сложные взаимосвязи элементов модели в различных точках многослойного куба [139].

В модели эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0) три оси координат:

а) ось координат архитектуры ("Уровни") с шестью слоями для представления информации, относящейся к активу;

б) ось координат "Жизненный цикл и объекты производства" для представления срока службы актива и стоимости (см. [141]);

в) ось координат "Уровни иерархии" для назначения функциональных моделей конкретным уровням на основе ГОСТ Р МЭК 62264-1 и ГОСТ Р МЭК 61512-1 [139].

Цель Индустрии 4.0 состоит в достижении высокого уровня операционной эффективности и продуктивности, а также более высокого уровня автоматизации промышленных предприятий. Однако предприятиям необходимо оценить свой уровень готовности для внедрения технологий Индустрии 4.0 и выбрать наилучшую стратегию. Для оценки уровня готовности разработаны различные методики [142, 143].

Цифровизация производства на основе эталонной архитектурной модели Industry 4.0 (RAMI 4.0) предполагает использование цифрового двойника изделия (Digital Twins) [144]. Цифровые двойники относятся к технологиям, которые обладают высоким потенциалом. В то же время нет единого понимания того, что означает эта технология. Определения используются вне дисциплинарных границ, что приводит к множеству различных интерпретаций. Концепции, стоящие за терминами, должны быть четко названы для передачи знаний и объединения разработок в области цифровизации производства [144].

Цифровой двойник — это виртуальное представление изделия или процесса, которое используется, чтобы оценивать и прогнозировать рабочие характеристики этого изделия или процесса [145 – 148]. Цифровые двойники позволяют моделировать условия труда в реальном времени и принимать обоснованные, экономичные решения для удовлетворения индивидуальных требований заказчиков [145]. Большой вклад в исследование теоретических и практических вопросов разработки и внедрения цифровых двойников и цифровой трансформации промышленности внесли ученые: Боровков А.И., Прохоров А.Н., Яблочников Е.И., Azango M., Grieves M., Hribernik K., Lopez P.C., Sierla S., Tao F., Udugama I., Wuest T., Zhang L. и др.

Выделяют три типа цифровых двойников: двойник изделия, двойник производительности и двойник производства [149]. Их взаимодействие показано на рисунке 1.6 [150].

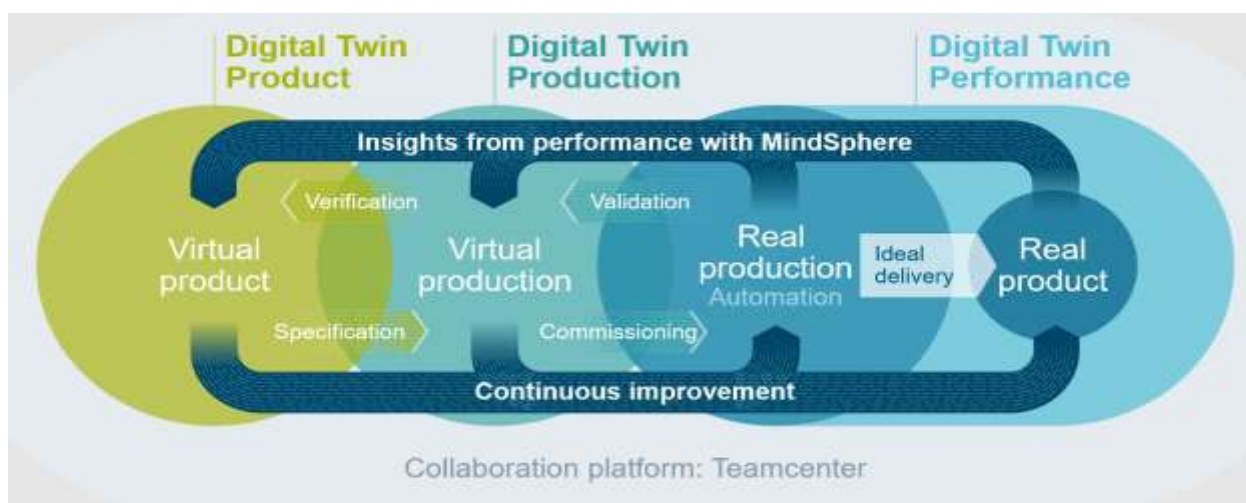


Рисунок 1.6 - Взаимодействие цифровых двойников [150]

Оригинальное слово	Перевод на русский язык
Digital Twin Product	Цифровой двойник продукта
Digital Twin Production	Цифровой двойник производства
Digital Twin Performance	Производительность Цифрового двойника
Insights from performance with MindSphere	Аналитика производительности с MindSphere
Verification	Верификация
Validation	Валидация

Virtual product	Виртуальный продукт
Virtual production	Виртуальное производство
Real production (Automation)	Реальное производство (Автоматизация)
Ideal delivery	Идеальная поставка
Real product	Реальный продукт
Specification	Спецификация
Commissioning	Ввод в эксплуатацию
Continuous improvement	Непрерывное совершенствование
Collaboration platform: Teamcenter	Платформа сотрудничества: Teamcenter

Цифровой двойник производства (ЦДП) – это цифровая 3D-имитационная модель производственной ячейки, линии, участка, цеха или производственного комплекса в целом [151]. Цифровой двойник производства позволяет до начала фактического производства изделий на основе комплекса математических моделей оценить качество производственного процесса для производственного подразделения [152, 153]. Моделируя производство с помощью цифрового двойника и анализируя полученные результаты, можно для разных условий разработать оптимальные стратегии. Для повышения эффективности можно создать цифровые двойники изделий для всего производственного оборудования, однако это редко бывает экономически целесообразно. Анализ результатов моделирования позволяет сократить простой дорогостоящего оборудования и спрогнозировать оптимальные периоды его технического обслуживания [423]. Результаты анализа технологической информации, поступающей в реальном времени, обеспечивают повышение эффективности и надежности реализации технологических операций.

Применение цифровых двойников производства позволяет существенно сократить длительность этапов жизненного цикла продукта до его выхода на рынок. Производство имеет собственный жизненный цикл. Развитый функционал для управления жизненным циклом непрерывных производств имеют программные комплексы COMOS (компания Siemens AG, Германия), DeltaV (компания Emerson, США), OmegaLand (компания

Yokogawa Electric Corporation, Япония), Factorytalk Analytics (компания Rockwell Automation, США) и др. Однако функционала этих программных комплексов недостаточно для создания полноценных цифровых двойников непрерывных производств. Цифровые двойники в настоящее время претерпевают значительную трансформацию от этапа концептуальных и теоретических исследований до внедрения и прикладного применения [154, 155]. Решение проблемы создания цифровых двойников непрерывных производств на основе цифровых платформ является актуальной темой многих современных исследований [151, 156 – 158].

Эволюционные изменения в подходах к реорганизации систем управления в рамках методологии четвертой промышленной революции на основе создания цифровых двойников (ЦД) позволяют сформировать эффективный подход к трансформации информационных систем (АСУП) в процессах управления. При достаточно высоком уровне обоснования понятия ЦД объекта производственной системы, существует недостаточно исследованная проблема обоснования понятия и содержания ЦД производственных процессов (ПП). В статье [157] представлены результаты исследования методов идентификации моделей ПП при формировании ЦД ПП как виртуального элемента производственной системы, апробированные в рамках реализации проектов управления производством машиностроительного холдинга.

Цифровизация оказывает свое влияние практически на все аспекты жизни человека, включая и отрасль промышленности. Благодаря новым технологиями могут быть изменены практически все процессы управления предприятием. Проблема исследования заключается в недостаточной изученности влияния 4-й индустриальной революции на общую систему управления предприятием. Моделирование бизнес-процессов организации помогает визуализировать операции для лучшего понимания и анализа. В статье рассматривается несколько различных техник и методов моделирования, таких как BPMN, BPEL, SADT, ARIS и др. [159].

Увеличению возможностей по автоматизированному управлению непрерывными производствами высококачественной продукции способствует прогресс в области разработки технологий цифровизации, машинного обучения, формализации и моделирования бизнес-процессов, постоянное развитие аппаратных и программных средств автоматизации в промышленности. Потребность расширения класса объектов «Автоматизированные организационно-технические процессы» включением в него компьютерных моделей производства для обеспечения цифровизации производства привело к необходимости создания новых методов решения задач управления.

Новый класс «Цифровизированные организационно-технические процессы» (ЦОТП) обладает чертами автоматизированных систем управления техническими и организационными процессами с расширенными возможностями поддержки принятия решения на основе многоуровневых компьютерных моделей. К основным характеристикам ЦОТП относятся: многоуровневость и изменчивость структуры, многокритериальность функционирования, недетерминированность, возможность моделирования поведения производственного персонала, прогнозирования поведения подсистем и др.

Цифровизированные организационно-технические процессы имеют гибридный характер, поэтому применение для синтеза этих систем управления формализованных методов управления, разработанных для технических систем, или эвристических подходов, используемых для организационных систем, не дает здесь желаемого результата.

Для повышения качества и оперативности принятия решений вновь возникающих задач управления целесообразно систематически анализировать результаты использования этих методов при решении задач автоматизированного управления цифровизированными организационно-техническими процессами.

1.3. Анализ методов управления качеством продукции и надежностью непрерывных производств

Современный уровень развития технологий автоматизации позволяет создавать производства, которые при постоянном контроле операторов могут выпускать один вид изделий в автоматическом режиме. Современные автомобилестроительные, стекольные, химические и металлургические предприятия в основном соответствуют требованиям, предъявляемым к автоматическим производствам. Для соответствия требованиям четвертой промышленной революции Industry 4.0 на таких производствах должны быть внедрены технологии интеллектуального мониторинга и автономного принятия решений для обеспечения в реальном времени оптимизации деятельности предприятий. Многие современные производства можно отнести к категории опасных объектов, на которых протекают физико-химические реакции при высоком давлении с выделением тепла и окислением, используются ядовитые вещества и образуются отходы I и II классов опасности и т.д. Все это негативно влияет на персонал предприятий и экологическую ситуацию в прилегающих к предприятиям районах. Оценка уровня промышленной безопасности на разных этапах жизненного цикла непрерывного производства необходима для поддержки принятия решений по снижению возможного экологического ущерба и повышению безопасности производств в целом [160].

Анализ уровней защиты является одним из наиболее часто используемых методов оценки рисков в жизненном цикле функциональной безопасности. Основная цель анализа уровней защиты (layer of protection analysis (LOPA) - определить, имеются ли в процессе достаточные защитные устройства или функции для обеспечения приемлемого уровня риска. Эти защитные устройства или элементы называются уровнями защиты или независимыми уровнями защиты (IPL). Примеры потенциальных уровней защиты включают базовую систему управления технологическим процессом (BPCS), вмешательство оператора, механическую целостность оборудования,

устройства физической защиты и функции, связанные с обеспечением безопасности. Уровни защиты технологического процесса показаны на рисунке 1.7 [161].

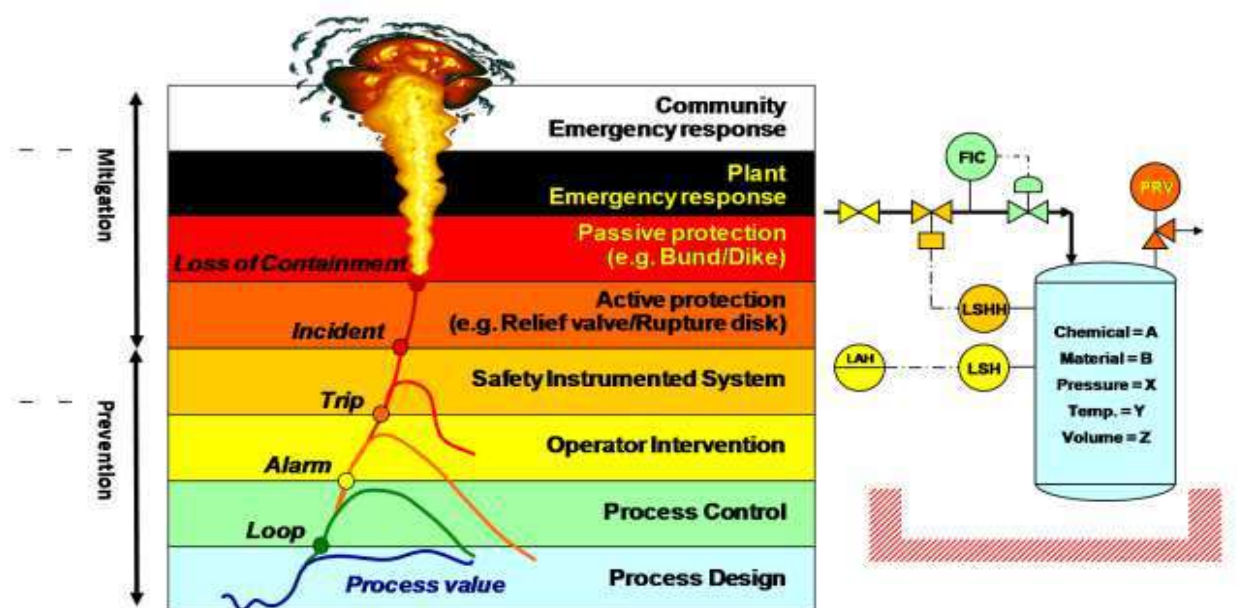


Figure 1. Layers of Protection and Their Impact on the Process

Рисунок 1.7 - Уровни защиты технологического процесса [161]

Оригинальное слово	Перевод на русский язык
Mitigation	Смягчение последствий
Prevention	Предотвращение
Community Emergency response	Экстренный ответ сообщества
Plant Emergency response	Экстренный ответ на заводе
Loss of Containment - Passive protection (e.g. Bund/Dike)	Потеря содержания - пассивная защита (например, Ванна/Дамба)
Incident - Active protection (e.g. Relief valve/Rupture disk)	Инцидент - активная защита (например, Клапан безопасности/Разрывной диск)
Trip - Safety Instrumented System	Трип - система безопасности с инструментами
Alarm - Operator Intervention	Сигнализация - вмешательство оператора
Loop - Process Control	Цикл - контроль процесса
Process Design	Проектирование процесса
Process value	Значение процесса
FIC (Failsafe Interlock Controller)	Контроллер безопасности с блокировкой
LSHH (Level Safety hardware)	Уровень безопасности реализуемый аппаратно
PRV (Pressure Relief Valve)	Клапан безопасности давления
LSH (Level Safety hardware)	Уровень безопасности аппаратный
LAH (Level Alarm Human)	Уровень сигнализации оператору

Chemical = A	Химическое вещество = А
Material = B	Материал = В
Pressure = X	Давление = X
Temperature = Y	Температура = Y
Volume = Z	Объем = Z
Figure 1. Layers of Protection and Their Impact on the Process	Рисунок 1. Уровни защиты и их влияние на процесс

В LOPA частота потенциально опасного события рассчитывается путем умножения вероятности отказа по требованию (PFD) каждого отдельного уровня защиты на частоту иницирующего события. [161].

Современный уровень развития систем автоматизации позволяет достигнуть более высоких стандартов, качества и верификации инструментальной системы безопасности (Safety Instrumented Systems (SIS)) на основе её применения на ключевых этапах разработки проекта, проектирования и закупок, строительства, тестирования и ввода в эксплуатацию ХТС [162]. Система инструментальной безопасности – независимая система, составленная из датчиков, логических решателей и элементов финального управления, обеспечивающая приведение процесса к безопасному состоянию при нарушении нормального режима функционирования процесса. SIS, по сравнению с базовыми системами автоматизации, используют дополнительные датчики и исполнительные устройства для обеспечения отработки технологической защиты.

Требования к системам противоаварийной защиты опасных ХТС определены стандартами:

- ГОСТ Р МЭК 61508-1- 2012. Национальный стандарт Российской Федерации. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью.
- ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов.

Исследования в области безопасности и надежности оборудования ХТС выполнены в работах [163 – 168]. Авторы [169, 170] предлагают комплексный подход и программное обеспечение для анализа надежности АСУ ТП с учетом стандартов МЭК 61508/МЭК 61511, которые учитывают как опасность, так и уровень важности того или иного отказа компонентов АСУ ТП для опасных производств.

Для анализа надежности технических систем используются современные программные комплексы [171 – 176]. Среди зарубежных программных комплексов выделяются: программный комплекс Relex Software (США) [171], комплекс программ компании Isograph Software (США) [171, 175], программный комплекс Risk Spectrum компании Relcon AB Software (Швеция) [176] для вероятностного анализа надежности и безопасности технических систем в атомной энергетике. Наибольшей модульностью и функциональными возможностями в области анализа, контроля и обеспечения надежности технических систем обладают отечественные программные комплексы: АРБИТР для автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем [172], CRISS 4.0 для моделирования и анализа систем безопасности ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности [173], АСОНИКА-К для анализа надежности радиоэлектронной аппаратуры [174] и др.

Программный комплекс АРБИТР предназначен для автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности, живучести и безопасности структурно-сложных систем, в том числе опасных производственных объектов и объектов использования атомной энергии. Комплекс является инструментальным средством поддержки проведения исследовательских, проектных, эксплуатационных работ и надзорных функций. Он зарегистрирован в реестре российского программного обеспечения Минкомсвязи (№ 2970, Приказ Минкомсвязи России от 09.03.2017 № 103), что позволяет использовать его в государственных и

муниципальных учреждениях, которым запрещена закупка иностранного программного обеспечения, и аттестован Ростехнадзором РФ для применения на опасных производственных объектах [172]. Теоретической основой комплекса является общий логико-вероятностный метод (автор А.С. Можаяев), использующий для структурного описания исследуемых свойств системы специальный графический аппарат-схему функциональной целостности [167, 177]. Основатель логико-вероятностного метода оценки надежности структурно-сложных систем – академик И.А. Рябинин [166].

Инструментальные средства поддержки жизненного цикла ХТС по проведению исследовательских, проектных, эксплуатационных работ и надзорных функций обеспечивают заданный уровень надежности, живучести и безопасности структурно-сложных систем, что является основой энергоресурсоэффективных производств, выпускающих высококачественную продукцию. Активизация продуктивной инновационной деятельности и усиление работы по эффективности функционирования системы стандартизации и управления качеством продукции обеспечивают переход Российской Федерации в число стран-лидеров шестого технологического уклада [178].

Управление качеством — это концепция, которая получила широкое распространение в современных компаниях для удовлетворения потребности в постоянном повышении операционного качества и производительности. Наиболее известными методиками в области качества сегодня являются ISO 9000 и Six Sigma. Основное различие между двумя концепциями ISO 9000 и Six Sigma заключается в том, что ISO 9000 — это набор требований, используемых в качестве основы для разработки всей системы менеджмента качества бизнеса, в то время как Six Sigma — это исключительно набор инструментов и методов, используемых для улучшения конкретных бизнес-процессов. В стандарте ISO 9000 нет инструментов для использования при внедрении, а Six Sigma не содержит стандартизированного набора

требований, признанных на международном уровне. Это отличает процессы сертификации ISO и Six Sigma. [179]

Процесс непрерывного управления качеством охватывает такие термины, как ISO 9000, Шесть Сигм и интеграция модели зрелости возможностей. ISO 9000 предоставляет стандарт, который просто содержит рекомендации, определяющие, каким должен быть продукт или процесс. Организация следует этим стандартам при определении программного обеспечения, аппаратного обеспечения, продуктов и поддержке поставок своих продуктов клиентам. Six Sigma фокусируется на измерении существующего процесса и выявлении недостатков в этом процессе. В реальных условиях Six Sigma действительно помогла выявить недостатки в дизайне, процессе и продукте. Интеграция модели зрелости возможностей также обеспечивает подход к совершенствованию процессов, который обеспечивает организации необходимыми элементами эффективного процесса. Приведенное ниже исследование дает более полное представление об общем управлении качеством и условиях, связанных с этим процессом [180].

Стандарт ISO 9001:2015 требует от организаций выявлять и устранять риски, влияющие на соответствие продукции и услуг требованиям, что приводит к повышению удовлетворенности клиентов. Для предотвращения и исправления нежелательных действий и результатов в этом исследовании предлагается основа для интеграции Шести Сигм и бережливого производства в систему менеджмента качества ISO 9000, чтобы преодолеть отсутствие ответа на вопрос “как делать” в системе ISO 9000 и создать эффективную систему документации, которая будет поддерживать постоянное совершенствование. Применение методологии проектирования для шести Сигм (DFSS) DMADV (определение, измерение, анализ, проектирование, проверка) и этапов решения проблем бережливого производства с составлением карт потоков создания ценности (VSM) была разработана и внедрена новая процедура для повышения операционной

эффективности в отделе. Результат показывает, что время, необходимое для разработки нового продукта, сокращается на 25%, а затраты снижаются на 20%. Исследование также показывает, что интеграция Шести Сигм и бережливого производства в систему ISO 9000 может помочь компаниям сократить затраты / отходы, повысить эффективность и увеличить прибыль. Кроме того, обеспечить постоянное улучшение непрерывности бизнеса [181].

ESG-менеджмент вносит значимый вклад в повышение качества продукции российского бизнеса, поэтому для совершенствования практики управления качеством в цифровом бизнесе России предложен новый подход, предполагающий ESG-менеджмент с опорой на ответственные инновации и институты информационного общества: институт электронной торговли, институт электронной отчетности о корпоративной социальной и экологической ответственности и институт ESG-финансов [182].

Для оценки и контроля состояния предприятий по вопросам качества и надёжности выпускаемой продукции разработан, внедрён для апробации и методически обеспечен комплексный подход, базирующийся на показателях результативности системы управления качеством и надёжностью продукции, в виде вектора состояния $R_{до}(t)$, который рассчитывается по формуле $R_{до}(t) = \{K_{доо}(t); R_{nc}(t); R_{ex}(t); P_{mc}(t); R_{куп}(t); R_{смк}(t)\}$, $t \in T$ (1) где T – период оценки; $K_{доо}(t)$ – комплексный коэффициент дефектности предприятия по совокупности выпускаемых ИОП; $R_{nc}(t)$ – показатель результативности производственной системы; $R_{ex}(t)$ – показатель результативности процесса входной контроль; $P_{mc}(t)$ – показатель результативности технологической системы предприятия; $R_{куп}(t)$ – показатель квалификационного уровня персонала; $R_{смк}(t)$ – показатель результативности СМК предприятия [183].

Применение комбинированного метода оценки параметров скрытых периодичностей для оценки качества рассмотрено в работе [184]. Применение статистических методов для управления качеством рассмотрено в работе [185].

«Дом качества» является эффективным методом развертывания функции качества, позволяющим повысить качество выпускаемой продукции [186 – 188].

Использование метода структурирования (развертывания) функции качества QFD в параллельном проектировании изделий на основе PLM-технологий обеспечивает решение проблем управления качеством и конкурентоспособностью продукции российских промышленных предприятий [189].

Согласно стандартам системы качества ISO серии 9000 качество – это совокупность характеристик объекта, имеющая отношение к его способности удовлетворить установленным и предполагаемым требованиям потребителя [190]. Для обеспечения соответствующих характеристик объекта в организации должна быть создана система управления качеством – организационная структура, функциональные обязанности, правила работы, процессы и ресурсы которой направлены на улучшение качества производимой продукции или оказываемых услуг. Система управления качеством включает в себя документы, определяющие политику в области качества, функции менеджеров, правила работы организации [191 – 193].

Методы управления качеством продукции непрерывных производств изложены в работах исследователей: Р.Н. Каримов, Р.И. Макаров, М.И. Смирнов, В.Д. Токарев, F. Fiorito, E.L. Grant, X. Liu, S. Karlsson, S. Wang, David M. Himmelblay и др. Современные тенденции развития промышленной политики и управления качеством продукции требуют применения перспективных технологий, которые содействуют выявлению и установлению закономерностей в важнейших секторах ее проведения в условиях цифровизации [194]. В числе таких нововведений целесообразно использовать методы искусственного интеллекта [195]. Нейронные сети, будучи важным разделом искусственного интеллекта, представляют собой эффективный инструмент анализа больших объемов негомогенных статистических данных при присутствии и линейных, и нелинейных зависимостей с использованием

специализированных программных комплексов: MatLab, Statistica, Viscovery SOMine, Deductor, Loginom и др. [194].

В работе [196] рассмотрена автоматическая система дефектоскопии, основанная на анализе основных компонентов, для пяти типичных дефектов защитного стекла: царапин, трещин, деформаций, отломов кромок и обрезки под углом. Эта система контроля надежна в отношении форм дефектов и обеспечивает высокую точность распознавания. Система контроля состоит из трех частей: предварительной обработки, распознавания дефектов на основе РСА и извлечения краев дефектов. После предварительной обработки устраняется большая часть шумов и выбросов, а пиксели дефектов на изображении хорошо увеличиваются для проверки и распознавания. К числу современных методик, составляющих систему менеджмента качества, можно отнести следующие методы: ISO, PDCA, QFD, Taguchi Methods, Kaizen, Lean Manufacturing, Program Zero Defects, TQM, Six Sigma, BPR [197].

Улучшение качества является постоянной деятельностью предприятия, направленной на повышение технического уровня продукции, качества ее изготовления, совершенствование элементов производства и системы качества [193, 197]. На ОАО «Борский стеклозавод» внедрена система качества ПО «Полированное стекло», которая построена на принципах соответствия требованиям международного стандарта ISO 9001, сочетании экономических и административных методов менеджмента, информационного обеспечения управляющих воздействий. Для установления необходимых информационных потребностей системы менеджмента качества в ПО «Полированное стекло» (в дальнейшем СМК ПС) использован метод анализа под названием «Критические факторы успеха» (КФУ) [198]. Содержание стратегического анализа заключается в том, что выделяется небольшое число целей, на которых информационные системы могут сосредоточиться [199].

Посредством анализа возможных путей улучшения СМК ПС можно переходить от существующей ситуации, отображаемой моделью «Как есть»,

к желаемой, которая будет описываться моделью «Как будет». Преобразование от состояния «Как есть» к состоянию «Как будет» совершается множеством шагов, так как с помощью однократного изменения невозможно предусмотреть все нюансы. Для моделирования системы менеджмента качества в ПО «Полированное стекло» более всего подходит IDEF0 – методология [199, 200].

В работе [201] представлены результаты изучения и анализа рискообразующих факторов, обуславливающих возникновение и интенсификацию рискованных ситуаций при производстве продукции из стекла.

Для разработки системы управления организацией и СМК используют современные специализированные программные комплексы: ARIS Platform, SILA Union, Business Studio, Draw.io, Gliffy, Visual Paradigm и др. [202 –211]. В этих системах разрабатывают описания бизнес-процессов в нотациях BPMN, eEPC и IDEF. Для отслеживания и управления деятельностью персонала на основе бизнес-процессов внедряют BPM-системы: ELMA Business Process Management, 1C, Bizagi Business Process Management Suite и др. [212]. Одной из задач СМК является постоянное повышение эффективности технологических процессов на основе анализа данных и выработке соответствующих корректирующих воздействий. Для проведения статистического анализа производства за истекший период берутся данные из системы мониторинга, последующая обработка которых проводится в системе «Технолог стеклового производства» [200], что позволяет наглядно оценить эффективность технологического процесса производства стекла.

Для выявления резервов дальнейшего повышения качества вырабатываемого стекла проводится имитационное моделирование работы технологической линии. Моделирование проводится с использованием ретроспективных данных, и исследуются различные алгоритмы управления процессом варки стекла. Целью моделирования является выявление резервов дальнейшего повышения качества стекла за счет совершенствования алгоритмов управления по сравнению с ручным ведением процесса. [200].

Имитационное моделирование производственных процессов проводят с использованием современных специализированных программных комплексов Arena, Plant Simulation, AnyLogic, Mathematica, Vissim, MATLAB+ Simulink, GPSS Studio, Rand Model Designer, Deductor и др. [213].

В статье [214] рассмотрены проблемы взаимодействия и оптимизации работы вспомогательных служб, задействованных на непрерывных производствах, на примере стекольного производства. Особое внимание уделено вопросам взаимодействия обслуживающего и ремонтного персонала по разным направлениям: электрики, электроники, механики и т. д. Описаны причины возникновения проблем и показаны наиболее частые проблемные ситуации, возникающие в процессе работы при взаимодействии различных служб одного производства. Расширение функциональных обязанностей сотрудников, обновление и усложнение оборудования неизбежно ведут к требованию постоянного обучения и совершенствования квалификации персонала, что является жизненно необходимым как для работоспособности предприятия, так и для обеспечения заказами от крупных международных потребителей продукции.

В работах [215, 216] раскрываются особенности цифровой трансформации в стекольной промышленности, которая сегодня является ключом к построению цифровой экономики и получению цифровых дивидендов, то есть достижению измеримых экономических результатов посредством внедрения цифровых технологий. Показано, что цифровая трансформация, как системное улучшение всех бизнес-процессов и бизнес-моделей во всей стекольной индустрии, сопровождающаяся крупномасштабными преобразованиями привычных технологических операций в производстве стекла в «умные», возможна путем создания цифровой стекольной фабрики будущего и перехода от «Стекольной Индустрии 4.0» к «Стекольной Индустрии 5.0», что способствует переходу к новому технологическому укладу [215].

1.4. Общая характеристика научно-исследовательских работ по автоматизированному управлению производством высококачественного листового стекла как сложной химико-технологической системы

Повышение энергоресурсоэффективности многостадийных производств высококачественного листового стекла играет основную роль в повышении конкурентоспособности продукции в условиях современного рынка [217 – 221]. Математическое моделирование этих производств позволяет определить пути повышения их энергоресурсоэффективности [222, 223].

Широко распространённой и проверенной методологией планирования энергоэффективности является математическая оптимизация и, в частности, линейное программирование со смешанными целыми числами (MILP). Несмотря на то, что в литературе представлено множество моделей MILP, нет единого мнения о том, какой уровень детализации необходим для моделей MILP, чтобы получить надёжные проекты энергоэффективных систем [224–226].

Модернизация и проектирование больших автоматизированных систем всегда связаны с необходимостью принятия решений в условиях большого числа неопределённостей. В практике методологии системного анализа обычно применяются методы решения этих проблем на основе моделирования. Главный подход состоит в декомпозиции больших систем на основе структурной и/или функциональной парадигм, которые позволяют рассматривать полученные составляющие как объекты для моделирования. При проектировании АСУ предприятия возникает необходимость оптимизации проектных решений. Для оптимизации проектных параметров этой системы в работе предлагается концепция, основанная на имитационной модели [227 – 229]. Программный комплекс AnyLogic для оптимизации параметров имитационной модели использует два механизма: генетический и OptQuest [230, 231]. Задачи многокритериальной оптимизации могут решаться с использованием диалогового алгоритма [232]. В основе алгоритма лежит

численное исследование (зондирование) пространства параметров проектируемой системы [233, 234].

Методы и алгоритмы цифрового инжиниринга и их применение для автоматизации многостадийных непрерывных производств исследуются научной школой академика РАН В.П. Мешалкина, предложившего и успешно развивающего новое направление в области инжиниринга химических производств «Теоретические основы инжиниринга и логистического управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных экологически безопасных химико-технологических систем» [2].

Многостадийное производство листового стекла флоат-способом включает в себя ряд сложных и взаимосвязанных химических окислительно-восстановительных реакций и физических процессов тепломассопереноса. Оно состоит из следующих стадий: приготовление шихты, стекловарение, формование ленты стекла на расплаве олова, отжиг ленты стекла, контроль дефектов, резка ленты стекла на листы заданного размера и упаковка полученных листов [235 – 239]. На рисунке 1.8 показана структурная схема производства листового стекла методом флоат-процесса.

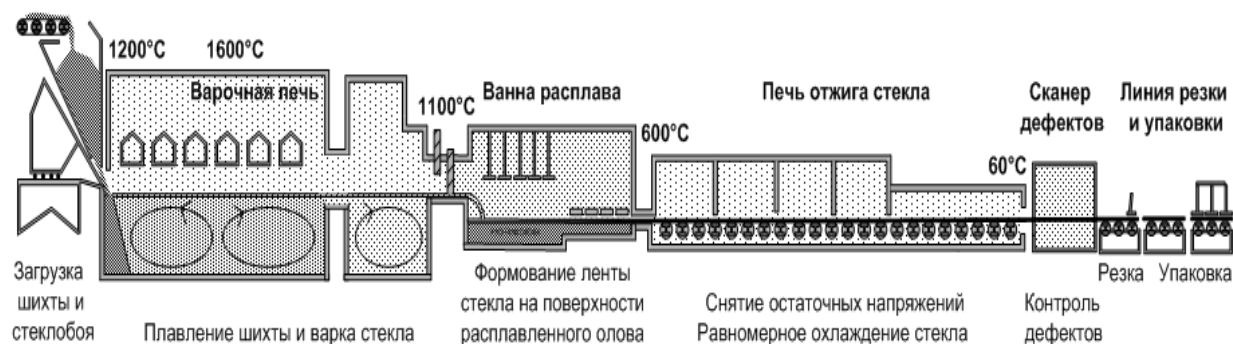


Рисунок 1.8 - Структурная схема производства листового стекла [332]

Начальные и конечные стадии производства листового стекла – приготовление шихты, резка ленты стекла на листы и их упаковка – относятся к дискретным технологическим процессам (ТП). Остальные стадии реализуются непрерывными ТП. Таким образом, многостадийное производство листового стекла носит дискретно-непрерывный характер.

Рассмотрим современный уровень исследований в области моделирования, автоматизации и автоматизированного управления технологическими процессами производства листового стекла методом флоат-процесса. Важный вклад в разработку методов моделирования технологических процессов, в т.ч. и производства листового стекла, внесли ученые: Т.А. Барбасова, В.И. Бобков, А.А. Большаков, А.В. Борщёв, член-корреспондент АН СССР Н.П. Бусленко, А.В. Гороховский, Т.В. Гусева, В.Э. Джашитов, В.В. Ефременков, В.А. Коваль, академик РАН В.Л. Макаров, Р.И. Макаров, В.Е. Маневич, А.С. Можаяев, В.М. Панкратов, Э.Я. Рапопорт, академик АН СССР Л.И. Седов, Я.Г. Сапунков, В.Ф. Солинов, М.Г. Степаненко, К.Ю. Субботин, Ю.И. Толуев, Е.Р. Хорошева, R. Conradt, D. Harel, R. Hartwell, O.S. Narayanaswamy, G. Schuh и др.

1. Приготовление шихты

Методы проектирования оборудования и режимы эксплуатации при дозировании, транспортировании компонентов шихты изложены в работе [240]. Рассмотрены сырьевые материалы и шихты, используемые для листового, тарного, медицинского, светотехнического стекла, стекловолокна, пеностекла, растворимого силиката натрия, сортовой посуды. Показано влияние технологических факторов на качество шихты и варку стекла.

Перспективы замены традиционной шихты на шихту, включающую синтетические сырьевые материалы (ССМ) или целиком состоящую из ССМ, показаны в работе [241]. Это позволит экономить сырьевые и топливно-энергетические ресурсы, упростить технологию подготовки стекольной шихты, интенсифицировать технологический процесс варки стекла, повысить качество и стабильность характеристик выпускаемого стекла, улучшить экологию.

В работе [242] исследуется сухой помол стеклобоя в эффективной планетарной мельнице. Дан анализ процесса переработки стекла в промышленности, оценены возникающие при этом проблемы. Показано, что это приведет к экономии как сырья, так и используемой при этом энергии. На

основании анализа фракционного состава измельченных продуктов даны рекомендации по рациональной загрузке помольных стаканов планетарной мельницы.

Вопросы расчёта и производства стекла, в частности, расчёт состава стекольной шихты, технология приготовления многокомпонентных смесей, особенности моделирования стекольного производства, рассмотрены в работах [243 – 245].

2. Варка стекломассы

Качество листового стекла во многом определяется процессом его варки, который зависит от множества факторов: скорости съема стекломассы, ее температуры в квельпункте и в точке съема, распределения температурного поля в печи, давления в варочной печи, обусловленного регламентом технологического процесса (ТП), и скорости работы загрузчиков. Поэтому существенное повышение качества невозможно без автоматизации процесса варки стекла на основе использования математических методов и современных аппаратно-программных средств [246 – 248]. В работе [249] предложен подход к повышению точности измерения уровня стекломассы в ванной печи, в основу которого положена система нечеткого вывода. Использование данного подхода при управлении технологическим процессом варки стекла обеспечивает существенное повышение его качественных показателей.

В работе [250] на примере ОАО «Гродненский стеклозавод» рассмотрено построение моделей по режимам потребления газа для исследования износа футеровки печного оборудования для варки цветного стекла. Установлено, что на формирование удельного расхода газа влияет не цветность стекла, а техническое состояние печи, в большей степени - ее футеровка.

Задача управления технологическим процессом производства полированного стекла в ОАО «Эй Джи Си «Борский стекольный завод» рассмотрена в статье [251]. В ней предложен критерий, отражающий результативность, ресурсоемкость и оперативность управления.

Комплексная оценка регулировочной способности энергоэффективности предприятия по производству листового стекла приведена в исследовании [252].

В работе [253] выполнено моделирование функционирования стекловаренной печи путем изменения технико-экономических показателей ее работы с целью оптимизации технологических процессов изготовления изделий из стекла, повышения энергоэффективности процесса и снижения экологической нагрузки на окружающую среду. На основе сформулированных допущений, описывающих физику процесса производства стекла, были описаны уравнения непрерывности, импульса, энергии, турбулентной кинетической энергии, диссипации турбулентной кинетической энергии в виде усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [254]. Определены начальные и граничные условия, необходимые для решения задачи математического моделирования.

3. Формование листового стекла

В настоящее время в Российской Федерации основной способ производства листового стекла — это флоат-процесс — метод формования в ванне с расплавом олова. Качество получаемого стекла предопределяет его использование в строительстве, машиностроении и производстве мебели без дополнительной механической обработки. Ранее функционировали предприятия, выпускающие листовое стекло менее производительными методами вертикального вытягивания и непрерывного проката [237, 256].

Компания Pilkington в 1952 году запатентовала процесс формования листового стекла методом флоат-процесса [255]. Результаты исследований различных особенностей процесса формования листового стекла приведены в работах [159, 257 – 259].

В работах [260, 261] рассматривается взаимосвязь оптических свойств флоат-стекла и технологических параметров его производства и возможности улучшения свойств флоат-стекла.

Существующие публикации [262 – 268] по вопросам моделирования этого процесса обладают недостаточной степенью формализации задач и отсутствием комплексного модельного подхода к их решению, что затрудняет их практическое использование для управления технологическим процессом и построения автоматизированных систем управления.

4. Отжиг ленты стекла

Структура автоматизированной системы расчета режимов отжига стеклоизделий для моделирования тепловых и релаксационных процессов в сортовом стекле рассмотрена в работах [269 –272]. Разработан метод поиска релаксационных постоянных, обеспечивающий наименьшее отклонение рассчитанных удлинений от экспериментальных. Показана необходимость идентификации параметров теплообмена изделия до и в печи отжига. Построен алгоритм расчета температурно-временных свойств и напряжений в стекле с учетом релаксационной модели стеклования.

В работах [273, 274] обоснован выбор температуры отжига ленты стекла на основе расчетов оптимальных параметров для отжига листового стекла.

5. Контроль качества стекла

Для решения технической задачи выявления точечных дефектов на плоском стекле мобильного телефона разработана автоматическая система оптического контроля. Система использует алгоритмы: формирования изображений, модели обнаружения цели, увеличения данных, сегментации переднего плана и объединения изображений, глубокого обучения YOLOv5. Её использование обеспечивает автоматизированную проверку плоского стекла мобильных телефонов с высокой надежностью, высокой точностью и низким уровнем ложной приемки и ложной браковки, что значительно снижает материальные потери на заводах и вероятность возникновения брака в последующих продуктах [196, 275].

В работе [276] предложен экспресс-метод прогнозирования свойств при физико-химической модификации силикатнатриевых материалов методом оценки структурных изменений на основе диэлектрической проницаемости

модифицированных силикатнатриевых композиций. Метод обнаружения оловосодержащих микровключений в теплопоглощающем стекле предложен в работе [277].

Система диагностики нарушений в производстве кварцевого стекла вакуум-компрессионным и газопламенным методами, а также различные дефекты кварцевых изделий при их производстве рассматриваются в работе [278].

Рассмотрены новые методы изучения и диагностики свойств и характеристик стекол, главным образом, оптического стекла, предложены алгоритмы обнаружения дефектов стекол по результатам измерения параметров импеданса на выбранных участках в работе [279].

В статье [280] рассмотрено применение аксиоматического анализа контроля качества продукции для оценки стабильности технологического процесса производства безопасного многослойного стекла для автомобильного транспорта, который не описывается нормальным законом распределений. Проверена стабильность процесса по качеству вырабатываемой продукции в пределах каждой смены и в пределах нескольких смен.

Общие причины и виды пороков стекломассы, появляющиеся на стадии варки стекла, а также дефекты, образующиеся на стадии формования изделия различными способами, представлены в работе [281]. Показаны способы устранения различных видов пороков.

В работе [282] предлагается метод автоматического обнаружения дефектов поверхности трубок из кварцевого стекла на основе машинного зрения. Для обработки изображений и обнаружения дефектов были применены функции вскрытия библиотеки алгоритмических OpenCV и язык программирования Python.

6. Резка ленты стекла

Развитию теории метода лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) при обработке материалов и деталей в машиностроении,

приборостроении, микро- и оптоэлектронике, получившего в последнее время широкое распространение, посвящены работы [283, 284].

7. Логистика в производстве стекла

В работах [285, 286] рассмотрен проект комплексной логистики для предприятия стекольной промышленности, определены основные параметры цепи поставок с учетом параметров складской и транспортной инфраструктуры, используемой при реализации проекта. Определены модели оптимального управления запасами, рассчитаны параметры поставки с учетом корректировки вместимости транспортных средств [285]. Проведено разделение потоков федерального и регионального уровней зон территориального обслуживания конечных потребителей [286].

8. Промышленная переработка стекла

Расширению областей применения листового стекла способствует создание технологий нанесения декоративных покрытий [287, 288]

В работе [289] показано, что показатели ресурсной эффективности следует использовать для расчета индикативных показателей углеродоемкости продукции, которые могут найти применение в нормировании выбросов парниковых газов российской промышленностью.

Системный анализ современных задач автоматизированного управления энергоресурсной эффективностью многостадийных производств высококачественного листового стекла

В работах [3, 290] изложена общая характеристика принципов и методов интенсификации химико-технологических процессов и химико-технологических систем. Приведена краткая характеристика научно обоснованных способов и приемов энергоресурсосбережения в химическом комплексе. Изложена краткая характеристика принципов автоматизированного синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных экологически безопасных химико-технологических систем. Изложено применение методов оптимизации показателей надежности, цифровизированного управления рисками и безопасностью при инжиниринге

энергоресурсоэффективных химико-технологических систем. Обоснована важность совершенствования многоуровневой подготовки кадров по направлению «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии». Подробно описаны приоритетные направления научных исследований по инжинирингу энергоресурсоэффективных химических технологий и химико-технологических систем, важнейшими из которых являются: методы интенсификации, комбинирования и миниатюризации химико-технологических процессов; методы цифровизированного инжиниринга и логистического управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных экологически безопасных наукоемких химико-технологических систем и цепей поставок предприятий химического, нефтегазохимического, биохимического, фармацевтического и химико-металлургического комплексов.

В научных исследованиях Хорошевой Е.Р. [291 – 294] предложен системный подход при создании интегрированной системы управления стекольного завода, методика выбора последовательности разработки и внедрения подсистем, с помощью которого определена очередность создания интегрированной системы на базе подсистемы управления качеством с последующим агрегированием ее с подсистемами управления охраной окружающей среды, профессиональной безопасностью и охраной труда.

В работе [295] рассмотрено современное состояние в области безопасного обращения химической продукции на основе системного подхода. Разработаны функциональная структура информационно-аналитической системы управления безопасным обращением химической продукции и обобщенный алгоритм классификации опасностей химической продукции в условиях неопределенности.

Результаты декомпозиции целостного процесса функционирования механизированной линии производства стеклянной тары на ряд структурных элементов – технико-технологических подсистем на основе блочно-

иерархического подхода – изложены в работе [296]. При синтезе имитационной модели функционирования технологического оборудования для производства стеклотары использовалась технология структурно-функционального моделирования. Описана структура и основные принципы построения разработанной модели, для реализации которой создана программа ModelPus 1.0 (язык программирования Microsoft Visual Basic). Для повышения качества работ по разработке и эксплуатации автоматизированных систем управления сложных стохастических систем целесообразным является применение вероятностного имитационного моделирования [297].

Производство листового стекла относится к тем отраслям экономики, где необходимо высокое качество принятия управленческих решений, поэтому для него может иметь наибольший положительный эффект применение сетцентрических методов управления [298].

Для повышения эффективности технологического процесса управления варкой стекла необходим его системный анализ, позволяющий выделить основные компоненты процесса, взаимосвязь между ними и взаимодействие с другими процессами. Для этой цели использован унифицированный язык моделирования UML, позволяющий получить целостное представление о неразрывно связанных автоматизированной и неавтоматизированной частях системы управления, получить общую картину ее функционирования и создать основу для построения эффективной системы автоматизированного управления с помощью существующих аппаратно и программно совместимых технических средств. Для визуализации результатов системного анализа использованы, в частности, следующие диаграммы: вариантов использования, состояний, последовательностей, классов. Используемая совокупность UML-диаграмм отражает функции системы управления, их взаимодействие и временные интервалы реализации, аппаратное и программное обеспечение [299].

В исследовании [300] предложен системный подход к повышению качества листового флоат-стекла, который предполагает использование

окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) стекломассы в качестве комплексного показателя, позволяющего оценить стабильность технологического процесса. Проведен анализ воздействия всех внешних и внутренних факторов, приводящих в конечном итоге к изменению концентрации анионов свободного кислорода, а значит, к изменению окислительно-восстановительного состояния расплава стекла.

В статье [301] представлена авторская методика интегральной оценки эффектов от реализации проекта развития производственной системы АО «Лыткаринского завода оптического стекла» при внедрении интерферометра КП-119 для контроля внеосевых асферических поверхностей. С целью получения синтетической оценки разработана система показателей для комплексного исследования эффектов, полученных от проекта внедрения нового прибора в рамках реализации политики импортозамещения. Разработанная система показателей отличается обоснованием разнообразных эффектов, проявляющихся от внедрения техники и оборудования (внутренние и внешние эффекты различной природы: эффект развития потенциала, социально-экономический, эффект импортонезависимости, общественный, экологический), а также предполагает компаративное сопоставление количественных значений показателей, рассчитанных до и после инкорпорирования проекта в производственную систему.

В диссертационной работе [302] с применением методов системного анализа разработаны структурные модели технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта, позволившие выявить ключевые показатели процессов и характеристики закаленного стекла, наиболее критичные с точки зрения качества.

В исследовании [303, 304] проведен анализ перспектив востребованности производства флоат-стекла различного качества. Модифицированный подход design envelope model (DEM) [305] применяется для демонстрации технологической компетентности и особенно стратегического мышления, касающегося понимания рынков и

позиционирования продукта. На основе подхода DEM компании могут разрабатывать сценарии реагирования на появление новых неожиданных инноваций в их собственной или смежных отраслях.

Рассмотрена проблема разработки автоматизированной системы управления процессом формования стекла на расплаве металла. Для повышения эффективности процесса управления в аварийных ситуациях проводится системный анализ, позволяющий выделить основные компоненты процесса, взаимосвязь между ними и взаимодействие с другими процессами. Для визуализации результатов системного анализа используется методология моделирования IDEF, позволяющая отразить функции системы управления, их взаимодействие и взаимодействие с другими процессами [306]. Данное представление информации позволяет при наличии экспертных данных о ходе технологического процесса решать задачи обучения персонала, анализа причин аварийных и предаварийных ситуаций и построить информационно-советующую систему для операторов стекольных производств.

Тренажеры

Для снижения риска ошибочных действий производственного персонала при авариях и нештатных ситуациях необходимо использование специальных цифровых тренажеров, позволяющих после обучения операторам своевременно выбирать и выполнять регламентированные действия по переводу технологического процесса из аварийного в штатный режим [307]. Цифровизированное управления рисками и безопасностью при проектировании энерго- и ресурсоэффективных химических производств обеспечивается использованием методов оптимизации показателей надежности [3]. На основе системного анализа опыта действий операторов в нештатных ситуациях (ухудшение качества, аварийные ситуации) разрабатываются математические модели для обнаружения нештатных ситуаций на ранних стадиях их развития [308, 309]. Математическое моделирование технологических процессов производства листового стекла осуществляют специализированные программные комплексы GFM (Glass

Furnace Model), NOGRID CFD и др., а также универсальные программные комплексы: Логос, ANSYS, COMSOL Multiphysics и др. Для повышения квалификации операторов необходимо использовать специальные цифровые тренажеры, интегрированные с информационными системами предприятия [310 – 312].

Высокоэффективное функционирование стекольной промышленности обеспечивается сокращением отходов стекла и затрат на производство при повышении качества выпускаемой продукции [313]. Увеличение количества отходов стекла во многом связано с возникновением нештатных ситуаций, заканчивающихся аварийным обрывом ленты стекла. В течение периода от обрыва ленты стекла до восстановления формирования качественного листового стекла производство несет убытки по затратам на поддержание температуры в варочной печи и заработную плату сотрудников. Внедрение новых технологий и технических средств выполняют при капитальном ремонте производства листового стекла. Это обеспечивает переход производства на новый уровень производительности и энергоресурсоэффективности. Поэтому в межремонтный период функционирования производства листового стекла для уменьшения отходов и снижения затрат необходимо анализировать передовой опыт и на его основе систематически повышать квалификацию технологов и операторов.

Перспективным направлением в области обучения и контроля знаний технологического персонала химических предприятий является использование цифровых тренажеров и инструментов Industry 4.0 [314, 315].

Применение цифровых тренажеров для обучения операторов обеспечивает: понимание оператором причинно-следственных связей функционирования объекта управления; повышение скорости реакции персонала на нештатные ситуации; приобретение опыта и навыков поведения в нештатных ситуациях; снижение психологической нагрузки и повышение уверенности персонала при управлении производством [316, 317]. Повышение профессионального уровня операторов химических производств обеспечивает

уменьшение брака продукции, улучшение экологических характеристик промышленного производства высокотехнологичных производств в соответствии с концепцией Industry 4.0 [318, 319].

Усовершенствованная инженерия знаний (KE), представленная графом знаний (KG), стимулирует развитие различных областей и инженерных технологий и обеспечивает различные интерфейсы объединения знаний и расширения их возможностей. В то же время advanced system engineering (SE) использует системную инженерию на основе моделей (MBSE) в качестве основы для реализации формального моделирования и анализа процессов всей системы. Эти две технологии дополняют друг друга и являются ключевыми технологиями для перехода от 2.0 к 3.0 в эпоху искусственного интеллекта и перехода от перцептивного интеллекта к когнитивному [320]. Применение таких технологий обеспечивает ускорение разработки компьютерных тренажеров.

Развита методика цифровизированного управления безопасностью ХТС с использованием современных программно-информационных инструментов, методов системного анализа ХТС, методов и принципов создания интеллектуальных интегрированных АСУ безопасностью производств НГХК [321 – 323]. В работе [324] предложено использовать системный подход к решению проблемы управления безопасным обращением с химической продукцией на всех ее стадиях жизненного цикла и по всей ЦП предприятий НГХК. Разработана функциональная структура информационно-аналитической системы управления безопасным обращением с химической продукцией, предложен алгоритм классификации видов опасностей химической продукции в условиях неопределенности.

В работе [325] рассмотрены аспекты цифровизации экономики стекольных производств. Показано влияние цифровизации на появление новых и изменение существующих бизнес-моделей. Благодаря модернизации стекольных производств на основе технологии «Индустрии 4.0» можно оптимизировать и автоматизировать основные производственные и

управленческие бизнес-процессы, повысить эффективность использования оборудования, а также усовершенствовать планирование расхода сырья и графика выпуска готовой продукции.

Таким образом наиболее глубоко исследованными являются технологические процессы: варки стекломассы, отжига ленты стекла и оптимизации раскроя стекла. Поэтому в данном исследовании наибольшее внимание уделено технологическим процессам: приготовления шихты, формования ленты стекла, контроля качества стекла, автоматической упаковки листов стекла для повышения энергоресурсоэффективности производства в целом на основе разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления многостадийным производством высококачественного листового стекла.

1.5. Выводы

Несмотря на наличие обширных теоретико-методологических исследований, направленных на создание автоматизированных химических и металлургических производств, не выработано единой методологии управления энергоресурсоэффективностью многостадийных производств, которая объединяет новейшие достижения современной науки управления и моделирования производства с учетом особенностей цифровизации стекольной промышленности в условиях промышленной революции «Индустрия 4.0». Наличие широкого круга нерешенных научных проблем разработки математического и программно-информационного обеспечения для автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийных производств высококачественного листового стекла обусловило цель и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертационного исследования являются: разработка методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления многостадийным производством высококачественного листового стекла на основе широкого применения

новых информационных технологий, разработка математических и компьютерных моделей ХТП для автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью сложных ХТС производства стекла.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие взаимосвязанные **научно-технические задачи**:

1. Выполнение системного анализа функционирования многостадийного производства высококачественного листового стекла как объекта автоматизированного управления.

2. Разработка математических и компьютерных моделей ХТП (приготовления шихты, формования ленты стекла, упаковки листов стекла) многостадийного производства ВЛС как объектов управления.

3. Разработка интеллектуально-статистического алгоритмического обеспечения автоматизированной системы (АС) диагностики точечных дефектов высококачественного листового стекла.

4. Разработка алгоритмического обеспечения иерархического АУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС как сложной химико-технологической системы.

5. Компьютерный инжиниринг пакетов прикладных программ (ППП) АУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС.

6. Разработка научно обоснованных рекомендаций по практическому применению ППП автоматизированного управления многостадийным производством ВЛС для повышения энергоресурсоэффективности конкурентных промышленных производств.

ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Системный анализ химико-технологических процессов многостадийного производства высококачественного листового стекла как объектов автоматизированного управления

Непрерывное многостадийное производство листового стекла относится к классу обобщенных динамических систем, которые представляют совокупность сложных взаимосвязанных объектов и процессов, изменяющихся во времени [499]. На рисунке 2.1 приведена функциональная схема производства листового стекла, которая, с точки зрения иерархии управления, включает: автоматизированную систему управления (АСУ) предприятием (ERP), АСУ производственными процессами (MES) и АСУ технологическими процессами (дозировочно-смесительной линии (ДСЛ), варки-выработки флоат стекла, контроля его качества в реальном времени (ККРВ) и упаковки). Модель показывает взаимосвязи технологических процессов и потребляемых ими ресурсов. К основным ТП производства листового стекла относятся: приготовление стекольной шихты P_{11} , варка стекла P_{12} , формование ленты стекла на расплаве олова P_{13} , отжиг стекла P_{14} , контроль качества стекла P_{15} , резка стекла P_{16} и его упаковка P_{17} [331].

К вспомогательным процессам относятся: управление складом сырья P_{10} , управление складом готовой продукции P_{18} , приготовление защитной атмосферы P_{21} , обеспечение электроэнергией, газом и водой (ЭГВ) P_{22} , обслуживание оборудования P_{23} , управление качеством стекла P_{31} , развитие объектов и системы управления P_{32} . Для перечисленных процессов в технических регламентах определены множества функций (алгоритмов) управления M для достижения множества целей предприятия G , которые определяются на заданных интервалах времени T [332].

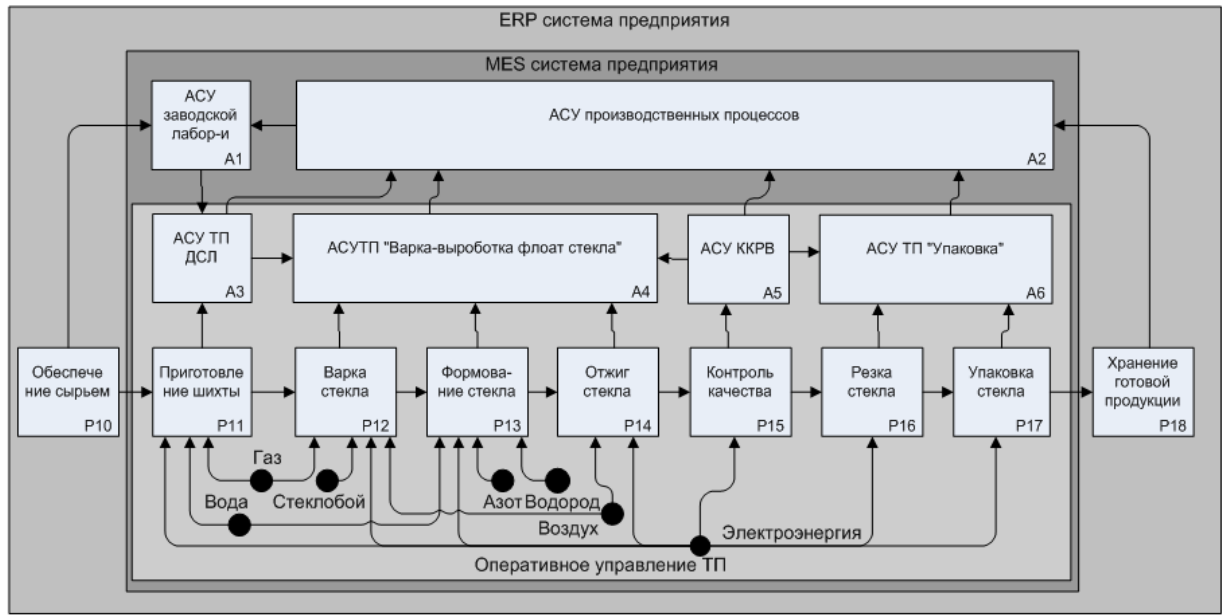


Рисунок 2.1 - Функциональная схема производства листового стекла

Пересечение выделенных процессов, целей, функций и периодов управления образуют комплексы задач управления (функциональные подсистемы): производством стекла $S_G = P_i \times M_i \times G_i \times T_i$, $i = 11 \div 17$; качеством стекла $S_Q = P_i \times M_i \times G_i \times T_i$, $i = 11 \div 17, 21, 22, 31$; потреблением энергоресурсов ЭГВ $S_U = P_i \times M_i \times G_i \times T_i$, $i = 11 \div 17, 21, 22$; обслуживанием оборудования $S_E = P_i \times M_i \times G_i \times T_i$, $i = 11 \div 18, 21 \div 23$; развитием производства $S_D = P_i \times M_i \times G_i \times T_i$, $i = 32$ и надежностью оборудования $S_N = P_i \times M_i \times G_i \times T_i$, $i = 10 \div 18, 21, 22$.

Комплексный критерий управления для многостадийного производства высококачественного листового стекла представляется в виде

$$\Phi = \left(P_r(R_g) - M(R_g) - E_r(R_g, C_{on}) - E_{eam}(R_g, C_{on}) - E(R_g) - B(R_g) - O(R_g) \right) * Q(S_h) - F_s(N) - H_m(R_g, E_d, H_F) \rightarrow \max,$$

где P_r – себестоимость единицы продукции; Q – плановое количество продукции; S_h – план, M – нормы материалов в соответствии с регламентом; R_g – регламент; E_r – затраты ресурса оборудования на производство стекла; C_{on} – показатели надежности оборудования, определяемые в процессе проектирования; E_{eam} – затраты на обслуживание оборудования для восстановления ресурса; H_m – затраты на персонал; E_d – затраты на обучение

персонала; H_F – воздействие человеческого фактора на производство; E – нормы расхода ЭГВ на производство единицы продукции; B – доля брака при производстве; F_s – ущерб от аварии; N – надежность производства; O – норма отходов производства на единицу продукции.

Представить аналитическое описание комплексного критерия управления для многостадийного производства высококачественного листового стекла Φ на пространстве параметров и характеристик состояний объекта управления практически невозможно. Поэтому проводится декомпозиция на множество взаимосвязанных задач управления в том числе и с использованием причинно-следственный подхода [492]. Решения этих задач согласованы и направлены на достижение оптимума комплексного критерия Φ . Комплексный критерий Φ используется в качестве оценочного.

Для изучения таких сложных объектов применяется системный анализ, который включает набор приемов и методов, связанных с предметной областью. Алгоритм системного анализа химико-технологического производства листового стекла как объектов автоматизированного управления включает этапы:

1. Постановка целей и задач на основе анализа проблем ХТС.
2. Декомпозиция и определение структуры ХТС.
3. Построение математических моделей процессов ХТС.
4. Разработка компьютерных моделей на основе математических моделей процессов ХТС.
5. Разработка цифровых двойников ХТС на основе интеграции компьютерных моделей с цифровыми платформами автоматизированного управления.

Рассмотрим этапы подробнее:

1. *Постановка целей и задач.* При ее осуществлении исследуемая химико-технологическая система представляется как взаимозависимое множество непрерывных технологических процессов. Они группируются в виде производственной линии. В рассматриваемых химико-технологических

системах исходное сырье с использованием физико-химических процессов преобразуется в конечную продукцию.

В качестве целей функционирования ХТС производства ВЛС определены:

- 1) уменьшение себестоимости конечной продукции, снижение времени производственного цикла,
- 2) фиксация относительно низкого уровня затрат (ориентация на уровень массового производства) при выпуске малых партий изделий,
- 3) оптимизация функционирования предприятий в реальном масштабе времени, клиент-потребительская ориентация выпускаемой продукции [134].

Для достижения вышеуказанных целей требуется решение задачи управления $\{CO, GCK\}$, где CO – это соответствующее описание объекта управления (ОУ), а GCK – это используемый обобщенный критерий управления ОУ [152, 326, 330].

Для описания объекта управления необходимо определить следующие структуры организационно-техническая, информационная, функциональная, принятия решений

$$CO = CO(OTC, IS, FS, DMS),$$

здесь характеристики структур: OTC – организационно-технической, IS – информационной, FS – функциональной, DMS – принятия решения.

Обобщенный критерий управления может быть записан в виде

$$GCK = \sum_{j=1}^n (wc_j, cv_j, ex_j) \rightarrow \min,$$

здесь wc_j – весовой коэффициент j -го критерия, cv_j – значение j -го критерия, ex_j – затраты на получение единицы j -го критерия. Определение критериев управления с последующей формализацией связана с анализом целей на основе требований заказчиков конкретной ХТС.

Традиционно выполняется декомпозиция общей задачи управления исследуемой химико-технологической системы на множество частных взаимосвязанных задач, т.к. в целом в аналитическом виде ее весьма сложно описать [327].

2. *Определение структуры.* Достаточно удобным и наглядным для описания и исследования химико-технологических систем представляется использование методологии IDEF0 [501]. Декомпозиция функционирования непрерывного производства показана на рисунке 2.2.

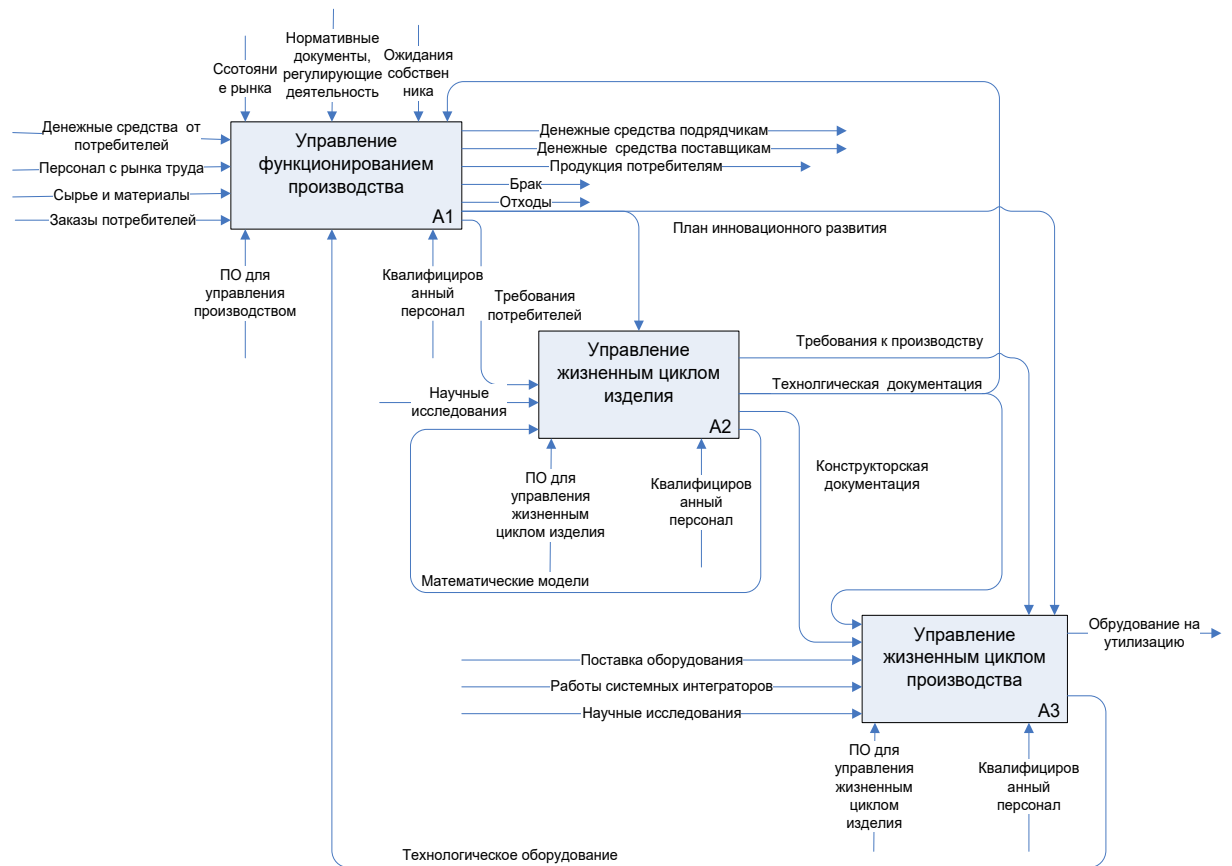


Рисунок 2.2 - IDEF0-диаграмма декомпозиции процессов непрерывного производства уровня A0, где A1 – управление функционированием производства, A2 – управление жизненным циклом изделия, A3 – управление жизненным циклом производства

Более детальный уровень декомпозиции показан на рисунке 2.3. Здесь процессы A1...A3 представлены как V-модель, которая далее применяется для построения информационных систем [501].

3. *Построение математических моделей.* При синтезе математической модели задаются подсистемы, описываются входные/выходные переменные, управляющие и возмущающие воздействия. Эта процедура выполняется на этапе 2.2 согласно ГОСТ 34.601-90

«Проведение необходимых научно-исследовательских работ». При этом согласно проведенному анализу [156, 312, 328] требуется характеристика следующих структур: организационно-техническая, информационная и функциональная для осуществления математического моделирования работы ХТС [326, 329].

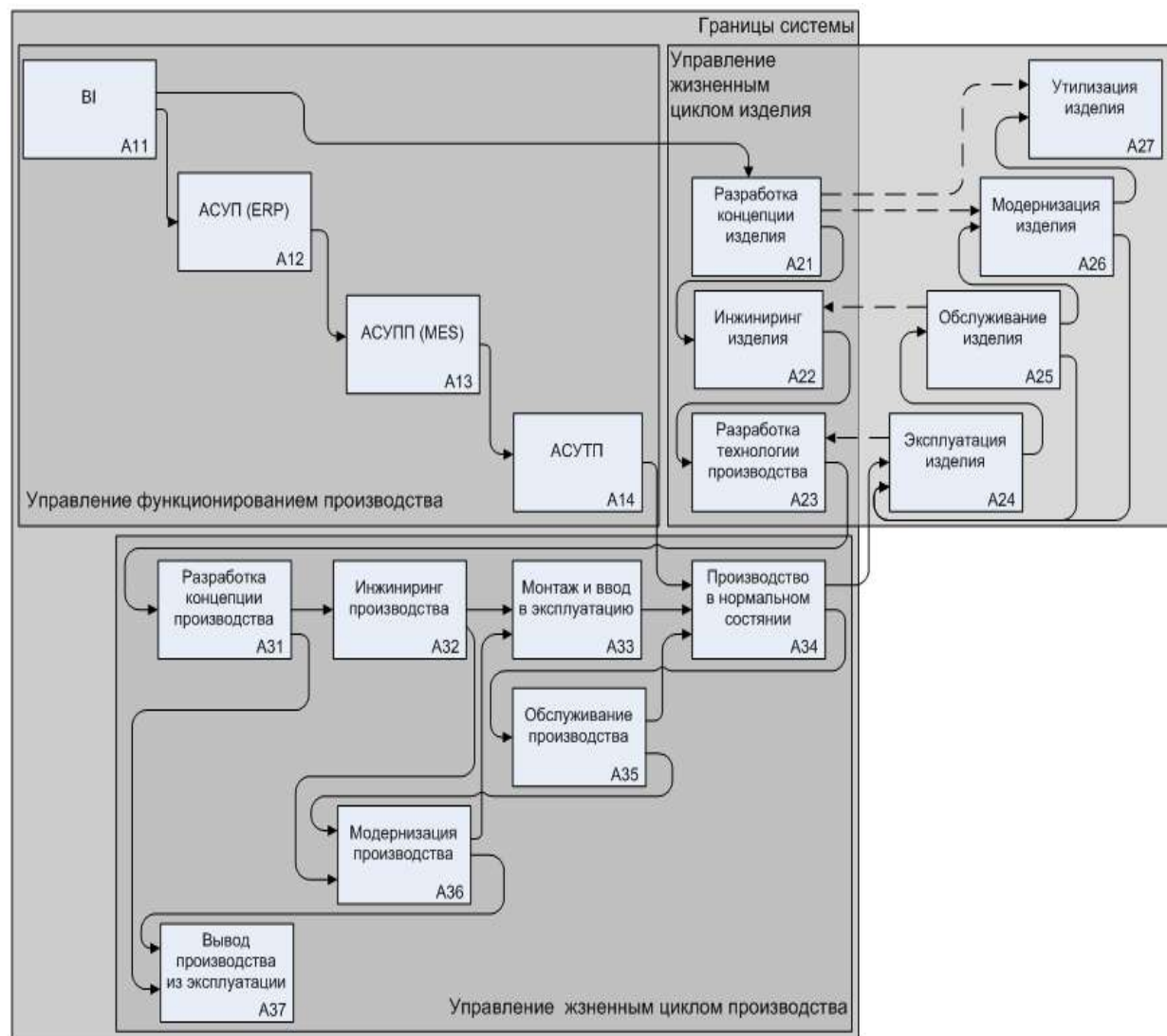


Рисунок 2.3 - Декомпозиция процессов A1, A2 и A3

Организационно-техническая структура

Предполагается, что исследуемая ХТС обладает определенной организационно-технической структурой *OTS*, характеризующаяся множеством оборудования *LE*, в котором протекает множество физико-химических процессов *P*, множеством технических (геометрическими, электрическими и др.)

характеристик оборудования $EC(c_{ji})$, матрицей $ERLM_{EC}$ взаимосвязей оборудования ($ERLM_{ECij} = 1$, если оборудование ec_i связано с оборудованием ec_j ; $ERLM_{ECij} = 0$, если оборудование ec_i не связано с оборудованием ec_j ; $ERLM_{ECij} = -1$, если оборудование ec_j связано с оборудованием ec_i); матрицей P_R взаимосвязей процессов ($p_{Rij} = 1$, если процесс p_i связан с процессом p_j ; $p_{Rij} = 0$, если процесс p_i не связан с процессом p_j ; $p_{Rij} = -1$, если процесс p_j связан с процессом p_i):

$$OTS = OTS(LE, P, EC, ERLM_{EC}, P_R).$$

Информационная структура

Математическая модель, которая описывает поведение динамической химико-технологической системы, имеет следующий вид:

$$VO = VF(TS, PCV, CPV, TPV, VIV, t),$$

где VO – вектор выходных переменных исследуемого технологического процесса, VF – заданная векторная функция, TS – функция, описывающая техническую структуру ХТС, PCV – вектор значений заданных ограничений объекта управления, CPV – вектор, содержащий описание значений параметров управляющих функций, TPV – вектор значений заданных параметров технологического процесса, VIV – вектор значений входных и возмущающих переменных исследуемого технологического процесса, t – функция времени. Предполагается, что функция VF принадлежит классу векторных функций, которые являются решением этого уравнения, численным или аналитическим.

Функциональная структура

Предполагается, что исследуемый ХТП может находиться в одном из определенных состояний определенного множества.

В каждый момент времени ХТС находится в одном из состояний множества LS . Эти состояния, в свою очередь, описываются заданной векторной функцией VF , целевой векторной функцией OVF , векторной функцией перехода между состояниями $SRVF$. Причем структура множества LS описывается заданной матрицей SRM взаимосвязей состояний ($srm_{lsij} = 1$, если состояние

ls_i связано с состоянием ls_j ; $sr_{m_{ls_{ij}}} = 0$, если состояние ls_i не связано с состоянием ls_j ; $sr_{m_{ls_{ij}}} = -1$, если состояние ls_j связано с состоянием ls_i):

$$LS = LS(VF, OVF, SRVF, SRM).$$

При допущении, что взаимные связи при смене состояний LS описываются автоматом Мили (AM), имеем следующее описание:

$$AM = (LS, FNI, FNO, \delta, \lambda, S_0),$$

здесь LS – множество состояний (непустое, конечное), $LS_0 \in LS$ – заданное начальное состояние автомата Мили; FNI – множество входных символов (непустое, конечное); FNO – множество выходных символов (непустое, конечное); $d: LS_i \times FNI \rightarrow LS_{i+1}$ – заданная функция переходов для описания пар состояние/входной символ к соответствующему состоянию; $m: LS \times FNI \rightarrow FNO$ – это заданная функция выходов, которая представляет отображение пары состояние/входной символ на заданный выходной символ.

4. Разработка компьютерных моделей на основе математических моделей процессов ХТС

Разработка компьютерных моделей технологических процессов и производства позволяет существенно сократить длительность этапов жизненного цикла продукта до его выхода на рынок. Программные комплексы COMOS (компания Siemens AG, Германия), DeltaV (компания Emerson, США), OmegaLand (компания Yokogawa Electric Corporation, Япония), Factorytalk Analytics (компания Rockwell Automation, США) и др. применяют для разработки компьютерных моделей технологических процессов непрерывных производств, но они не обеспечивают создания полноценных цифровых двойников непрерывных производств, которые включают компьютерные модели технологических процессов, 3D-модели производства и цифровые платформы автоматизированного управления.

Цифровые двойники в настоящее время претерпевают значительную трансформацию от этапа концептуальных и теоретических исследований до внедрения и прикладного применения [156, 312]. Решение проблемы создания

цифровых двойников непрерывных производств на основе цифровых платформ является актуальной темой многих современных исследований [329, 330].

Управление энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла. Управление энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла нацелено на рациональное (эффективное) использование в производственном процессе сырьевых и энергетических ресурсов для обеспечения заданного количества высококачественного листового стекла.

Основными источниками информации для разработки математических моделей является: документооборот предприятия; события, фиксируемые диспетчерской службой предприятия; значения технологических параметров, сохраняемых в архивах SCADA-систем. Перечисленные источники информации относятся к различным уровням автоматизированных систем управления предприятием, производственными процессами и технологическими процессами, которые формируют иерархическую структуру управления предприятием. На рисунке 2.4 приведена структура декомпозиции источников информационной модели, которая позволяет анализировать и дополнять по результатам анализа информацию на соседних уровнях иерархии [301].

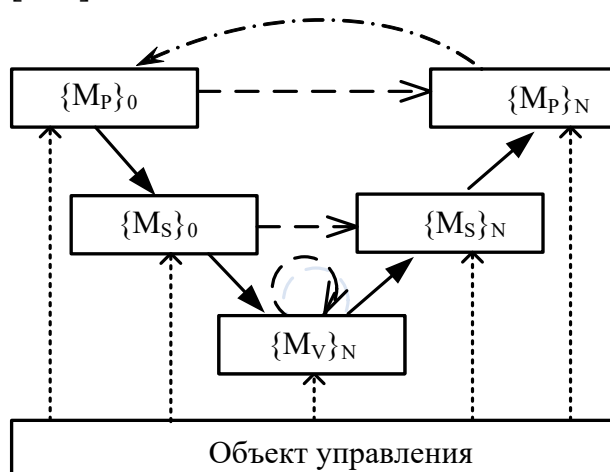


Рисунок 2.4 - Структура декомпозиции информационных моделей

Связь процессов, событий и параметров с объектом управления на рисунке 2.4 представлена пунктирными стрелками. Сплошные стрелки

показывают отношения декомпозиции и агрегирования информации. Повышение адекватности информационной модели объекту управления показано штрихпунктирной линией. На рисунке 2.4 показаны модели процессов M_P , событий M_S и технологических параметров M_V . Штриховые стрелки показывают изменение по результатам системного анализа из начального в новое состояние множества моделей процессов $\{M_P\}_0 \rightarrow \{M_P\}_N$, событий $\{M_S\}_0 \rightarrow \{M_S\}_N$ и технологических параметров $\{M_V\}_0 \rightarrow \{M_V\}_N$.

Множество моделей процессов $\{M_P\}$ описывает работу персонала, документооборот и позволяют выполнять имитационное моделирование и функционально-стоимостной анализ для оптимизации процессов по стоимости и времени выполнения. Модели процессов формализуются как иерархические структуры (системы массового обслуживания СМО) с заданием времени обслуживания, норм потребляемых ресурсов, условий ветвления, связей и переменных.

Множество событийных моделей $\{M_S\}$ описывают переход из состояния в состояние (качественное изменение значений технологических параметров), условия переходов, изменения ресурсов и работу оборудования. Модели событий строятся с использованием автоматного и причинно-следственного подходов на основе результатов системного анализа моделей процессов и множества технологических параметров.

Множество моделей $\{M_V\}$ описывает взаимосвязи технологических параметров и позволяет моделировать изменения параметров и ресурсов объекта управления на основе уравнений, задания начальных и граничных условий. Для моделирования непрерывных технологических процессов применяется аналитическое численное моделирование в виде алгебраических, дифференциальных и других уравнений, а также предусматривающих осуществление однозначной вычислительной процедуры, приводящей к их точному решению. Для дискретных процессов применяется имитационное моделирование.

Пример информационной модели многостадийного производства листового стекла приведен на рисунке 2.5, на котором символом «`» обозначено новое состояние соответствующего множества моделей.

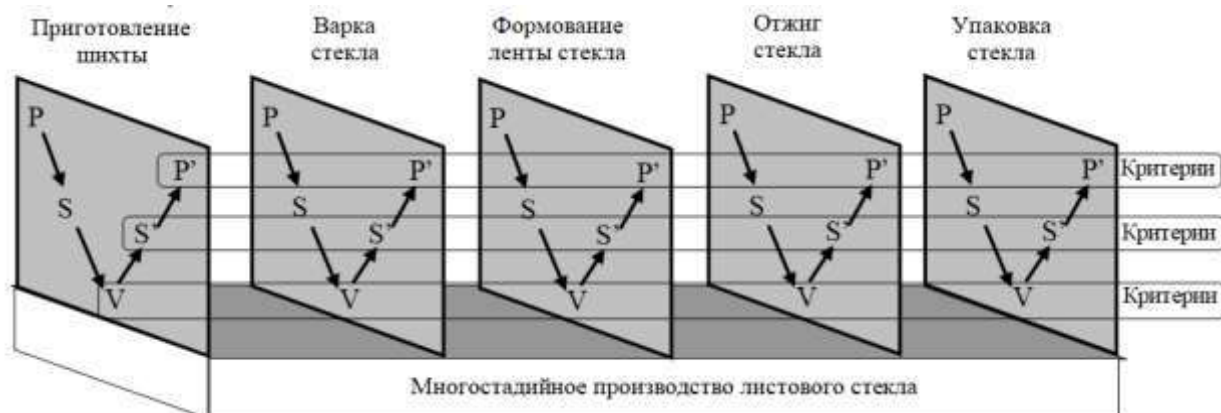
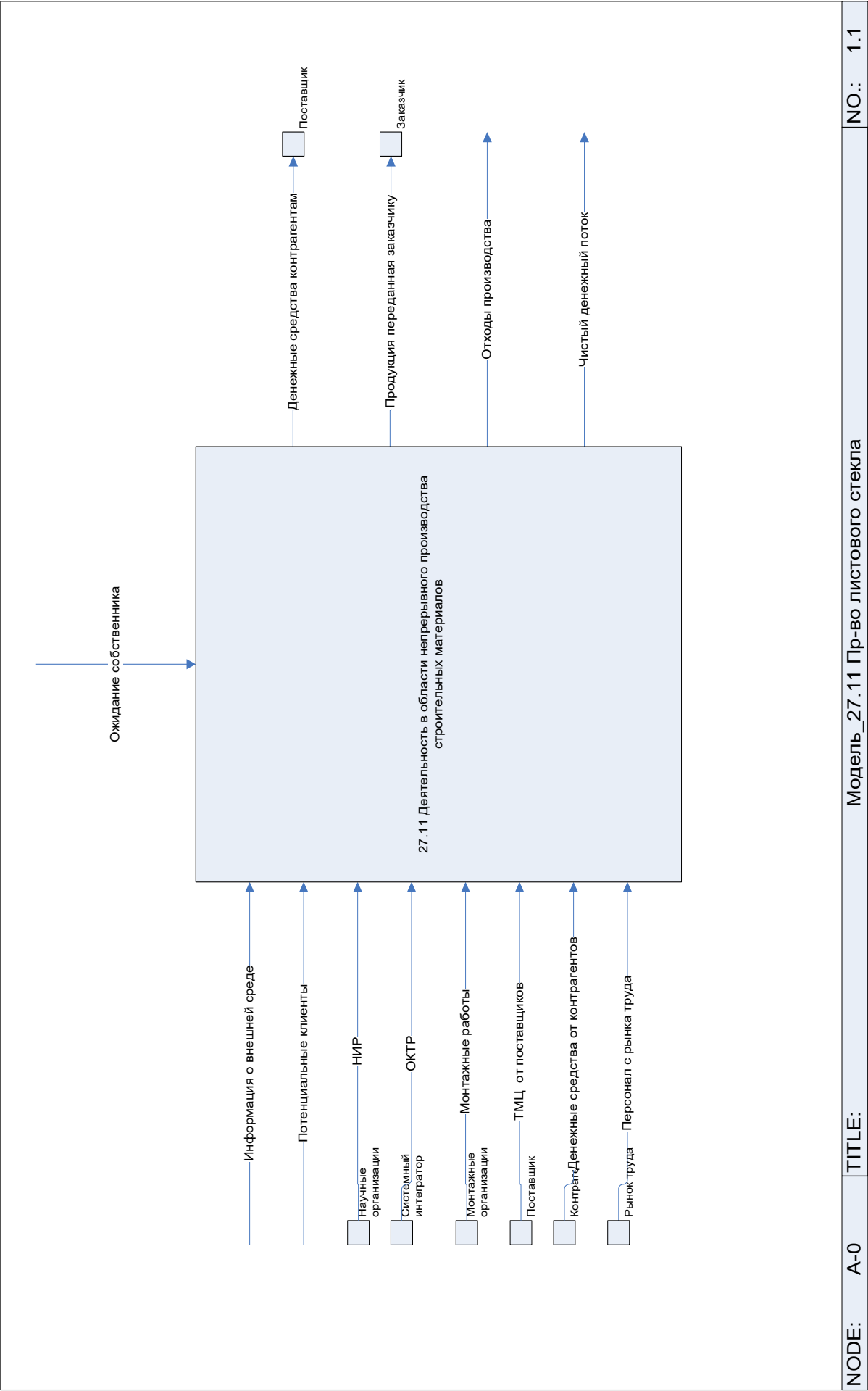


Рисунок 2.5 - Информационная модель производства листового стекла

При описании функционирования производства листового стекла как процесса А0 «Деятельность в области непрерывного производства строительных материалов» в нотации IDEF0 к основным входящим потоками информации и ресурсов относятся: 1) денежные средства от контрагентов, 2) информация о внешней среде, 3) монтажные работы, 4) НИР, 5) ОКТР, 6) персонал с рынка труда, 7) потенциальные клиенты, 8) товарно-материальные ценности от поставщиков. Основными выходящими потоками информации и ресурсов являются: 1) денежные средства контрагентам, 2) отходы производства, 3) продукция, переданная заказчику, 4) чистый денежный поток. На рисунке 2.6 показана диаграмма А-0 «Производство листового стекла» с основным процессом А0 «Деятельность в области непрерывного производства строительных материалов», описанная в нотации IDEF0.

На основе декомпозиции этого процесса разработана диаграмма А0 (рисунок 2.7) и выделены процессы: А1 «Разработка стратегии и развитие бизнеса», А2 «АСУ предприятия», А3 «Управление жизненным циклом предприятия», А4 «Система менеджмента качества», А5 «АСУ производственных процессов (Планирование и производство)». На рисунках 2.8 – 2.11 показана декомпозиция функций предприятия.



NODE: A-0

TITLE:

Модель_27.11 Пр-во листового стекла

NO.: 1.1

Рисунок 2.6 - Диаграмма А-0 «Производство листового стекла»

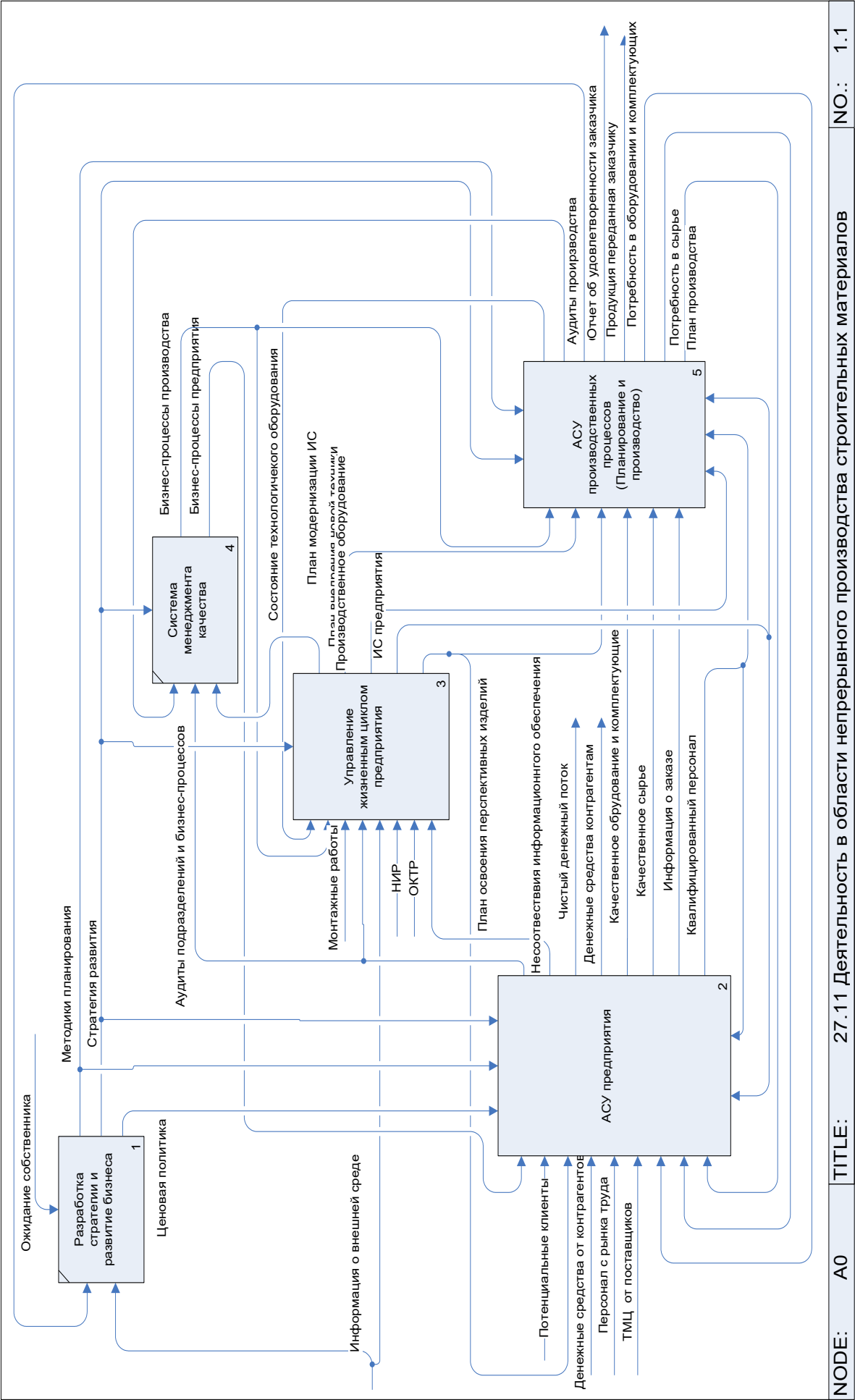


Рисунок 2.7 - Диаграмма А0 «Деятельность в области непрерывного производства строительных материалов»

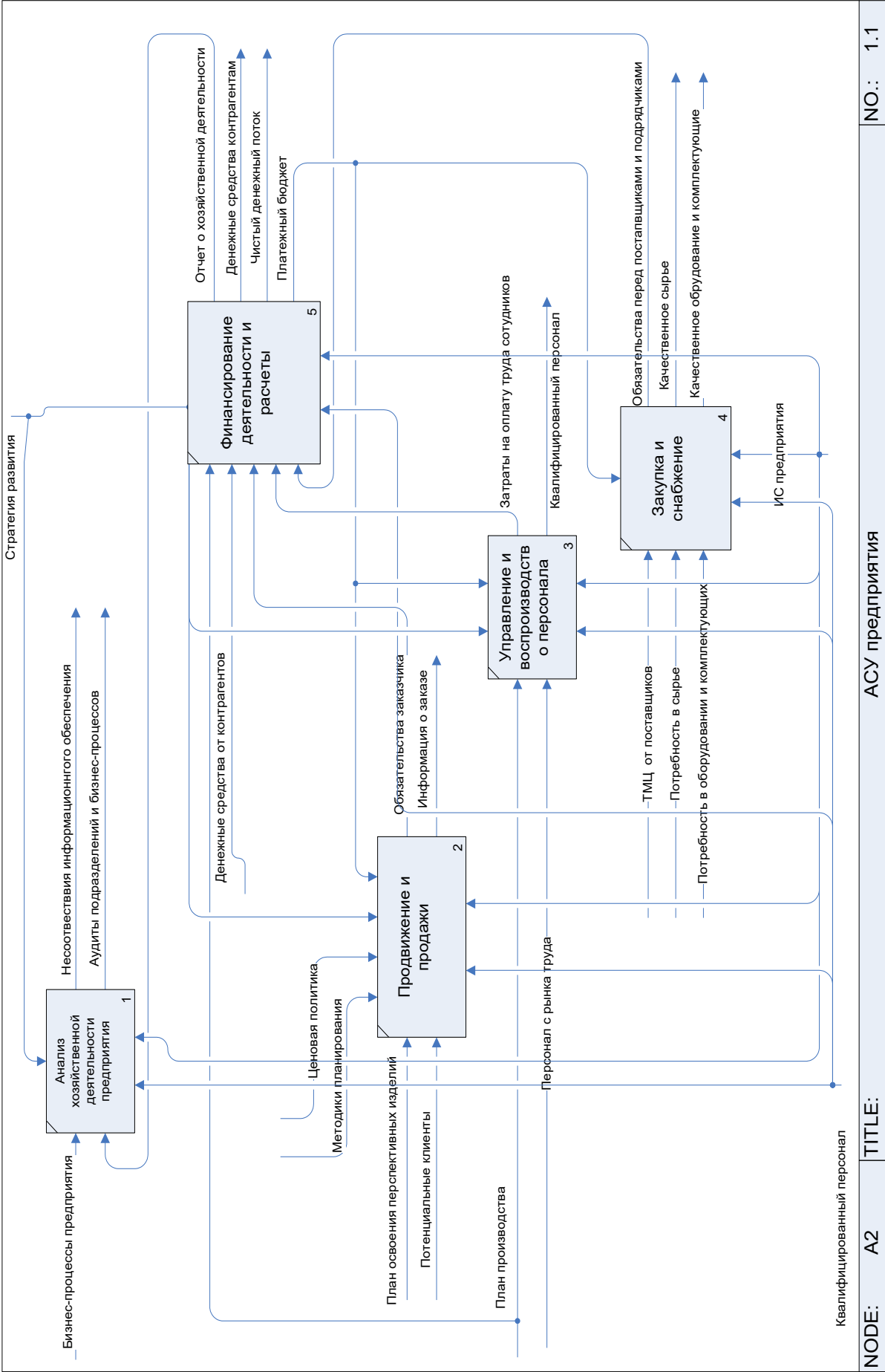


Рисунок 2.8 - Диаграмма A2 «АСУ предприятия»

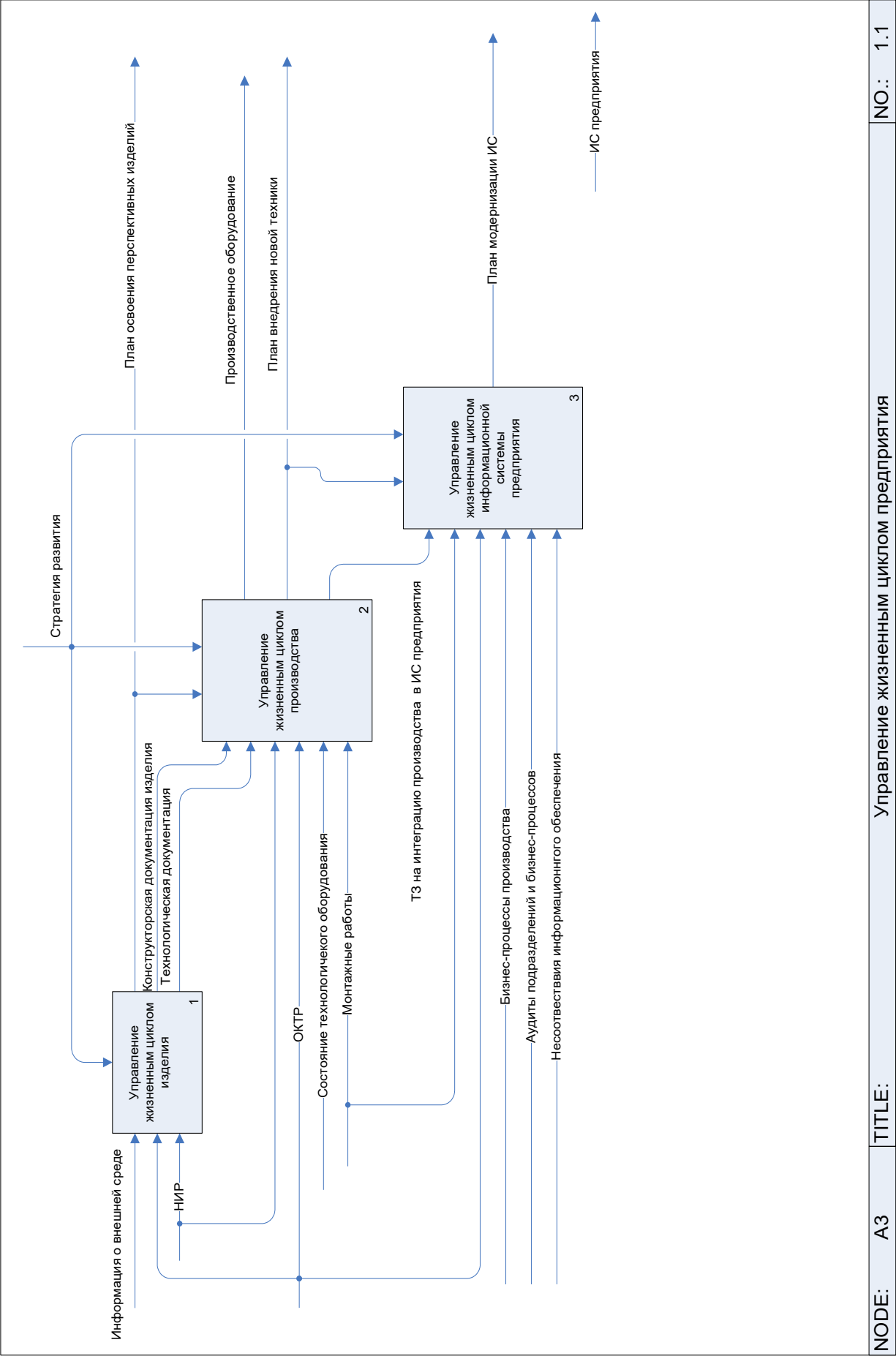


Рисунок 2.9 - Диаграмма А3 «Управление жизненным циклом предприятия»

NODE: А3	TITLE: Управление жизненным циклом предприятия	NO.: 1.1

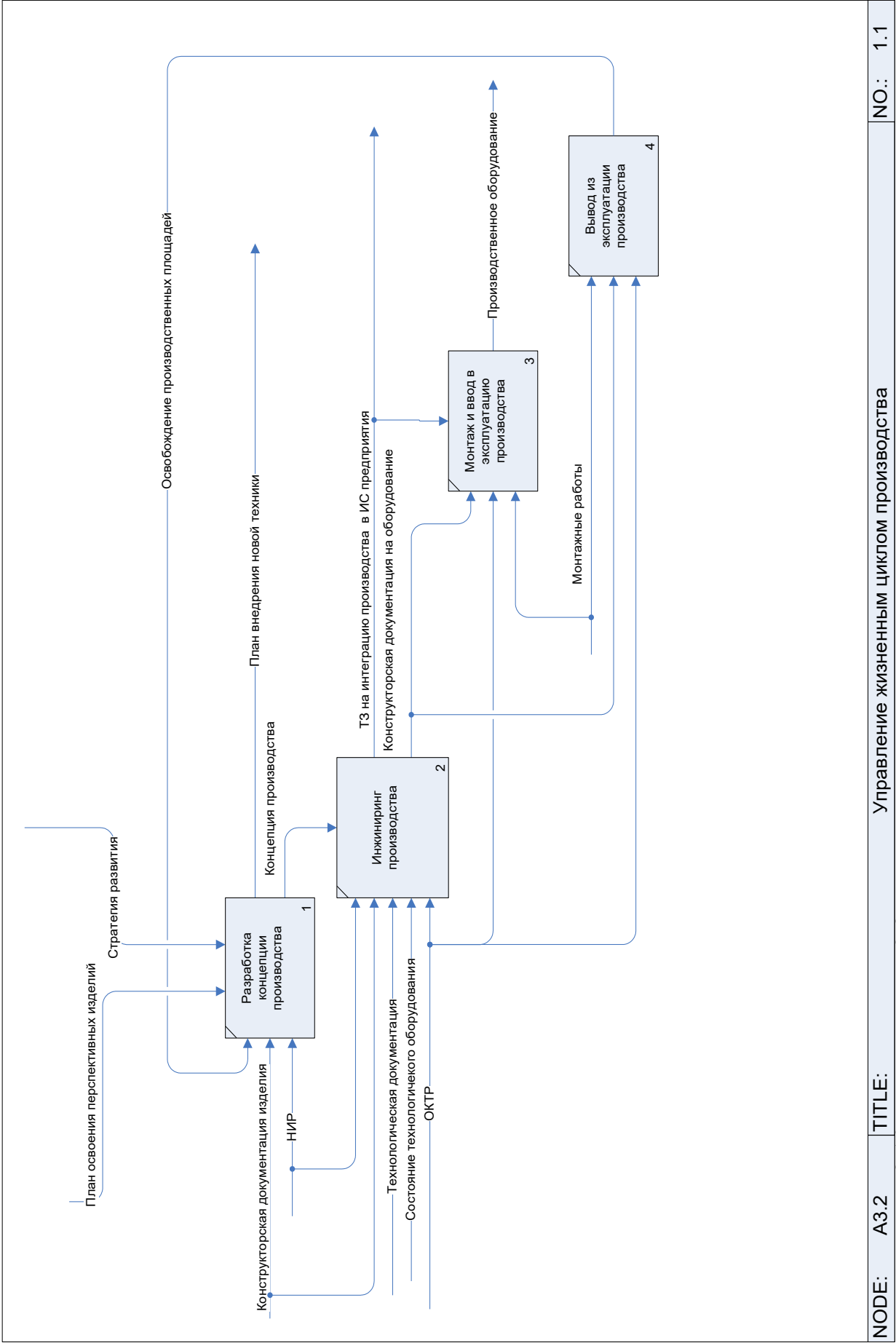


Рисунок 2.10 - Диаграмма A3.2 «Управление жизненным циклом производства»

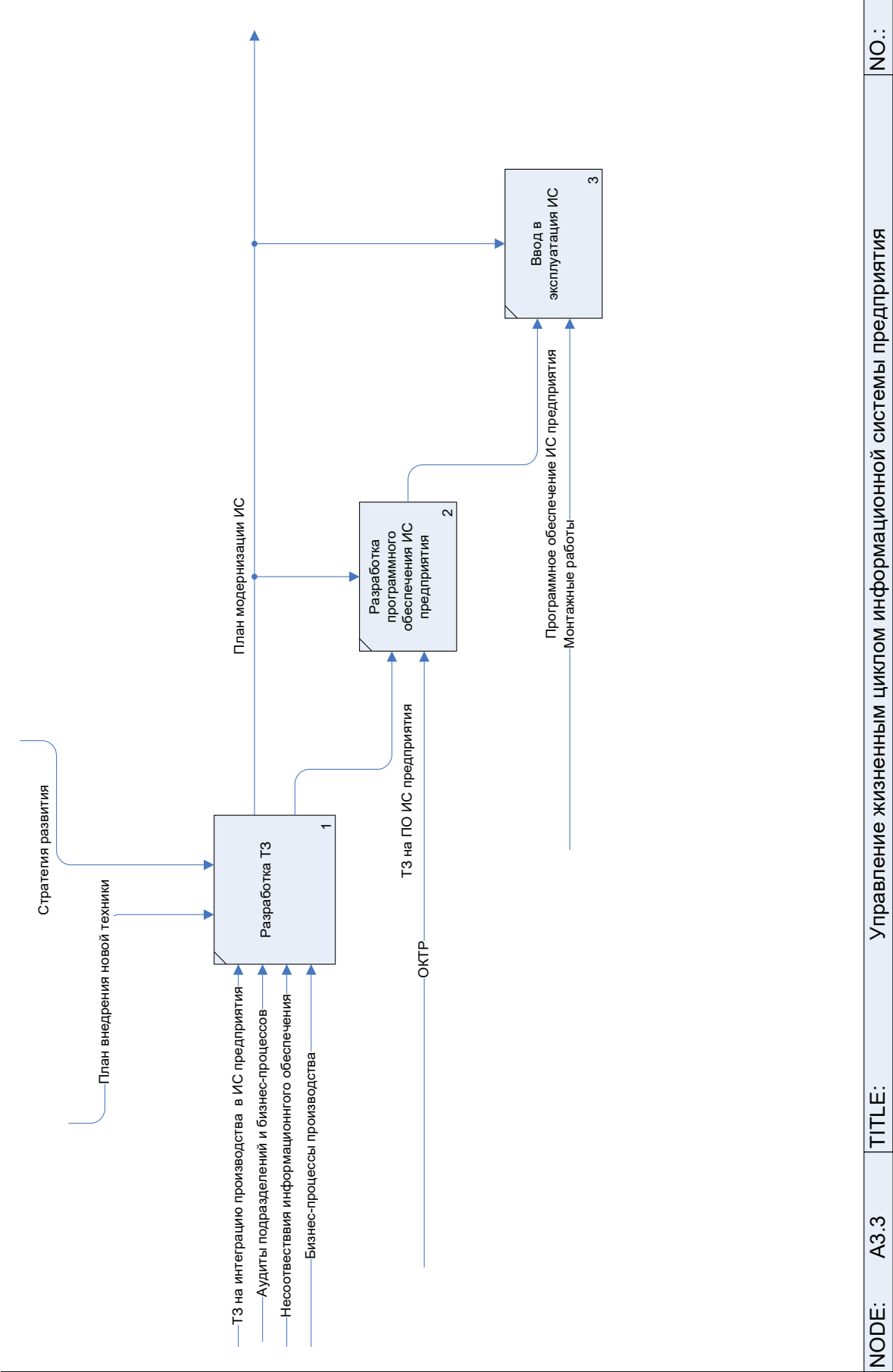


Рисунок 2.11 - Диаграмма 3.3 «Управление жизненным циклом информационной системы предприятия»

Анализ функционирования предприятий стекольной промышленности показывает, что значительные резервы повышения производительности труда и объемов производства высококачественного листового стекла сосредоточены на уровне цехов предприятия. Современный уровень автоматизации производств листового стекла и развития методов компьютерного моделирования при разработке специального математического обеспечения автоматизированных систем управления производственными процессами создает условия управления энергоресурсоэффективностью производства в реальном времени.

В процессе А5 «Управление производственными процессами» к основным входящим потокам информации и ресурсов относятся: 1) описание бизнес-процессов производства, 2) информация о заказе, 3) качественное сырье с постоянным составом, 4) природный газ, 5) защитная атмосфера, 6) вода, 7) планы внедрения новой техники и освоения перспективных изделий и др. Основными выходящими потоками информации и ресурсов являются: 1) продукция, переданная заказчику, 2) отходы производства, 3) план производства, 4) потребность в сырье, 5) потребность в оборудовании и комплектующих, 6) состояние технологического оборудования, 7) информация о результатах аудита производства и др. Процесс А5 «Управление производственными процессами» показан на рисунке 2.12.

На рисунках 2.13 и 2.14 показаны диаграммы А5.3. «Управление технологическими процессами» и А.5.3.3 «Производство стекла», соответственно. Таким образом выполнена декомпозиция функций предприятия до основных технологических процессов, обеспечивающих выпуск листового стекла.

Предприятия стекольной промышленности при реализации организационных мероприятий по повышению производительности труда и объемов производства высококачественного листового стекла на цеховом уровне сталкиваются со следующими проблемами:

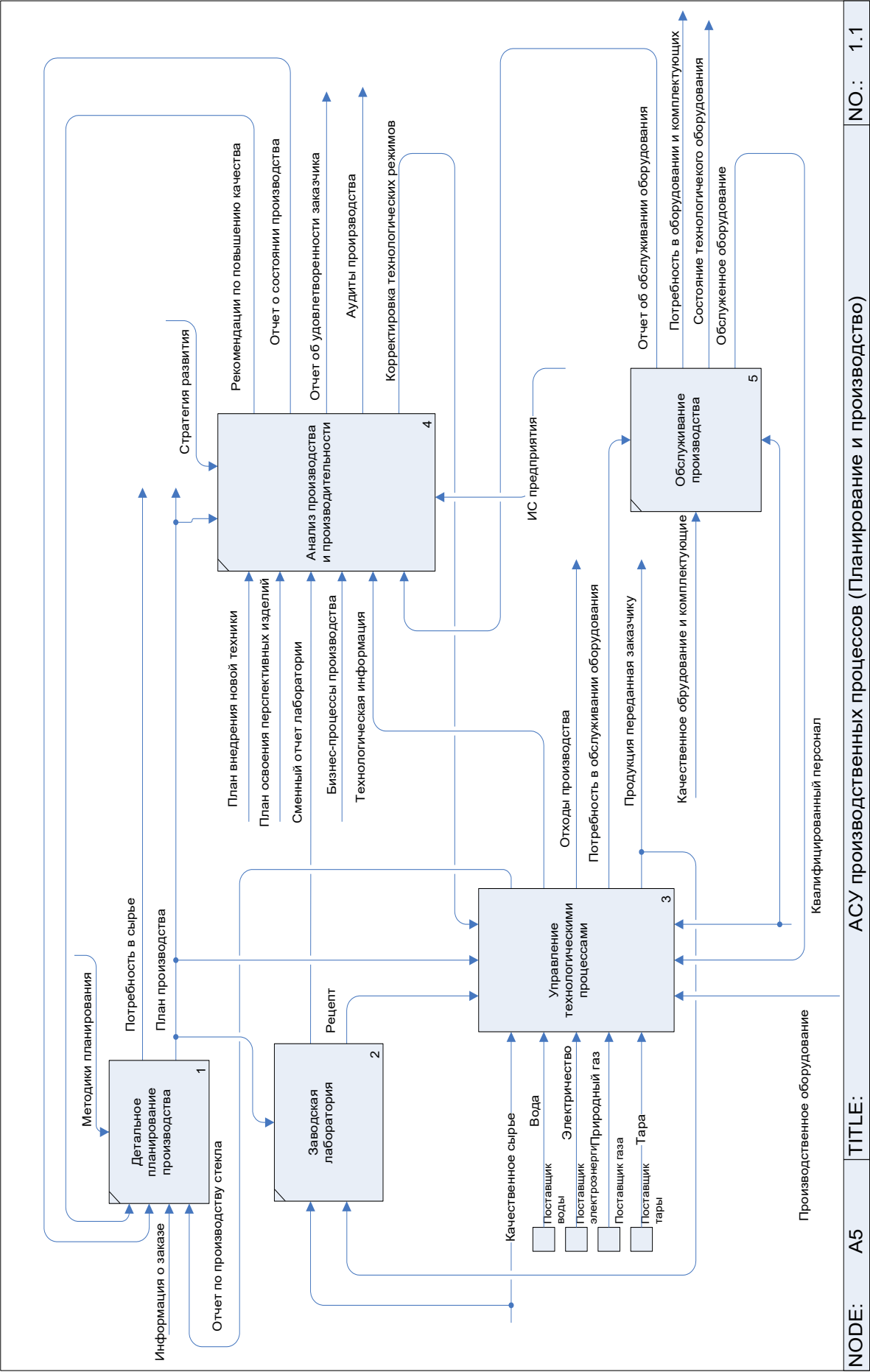


Рисунок. 2.12 - Диаграмма А5 «АСУ производственных процессов (Планирование и производство)»

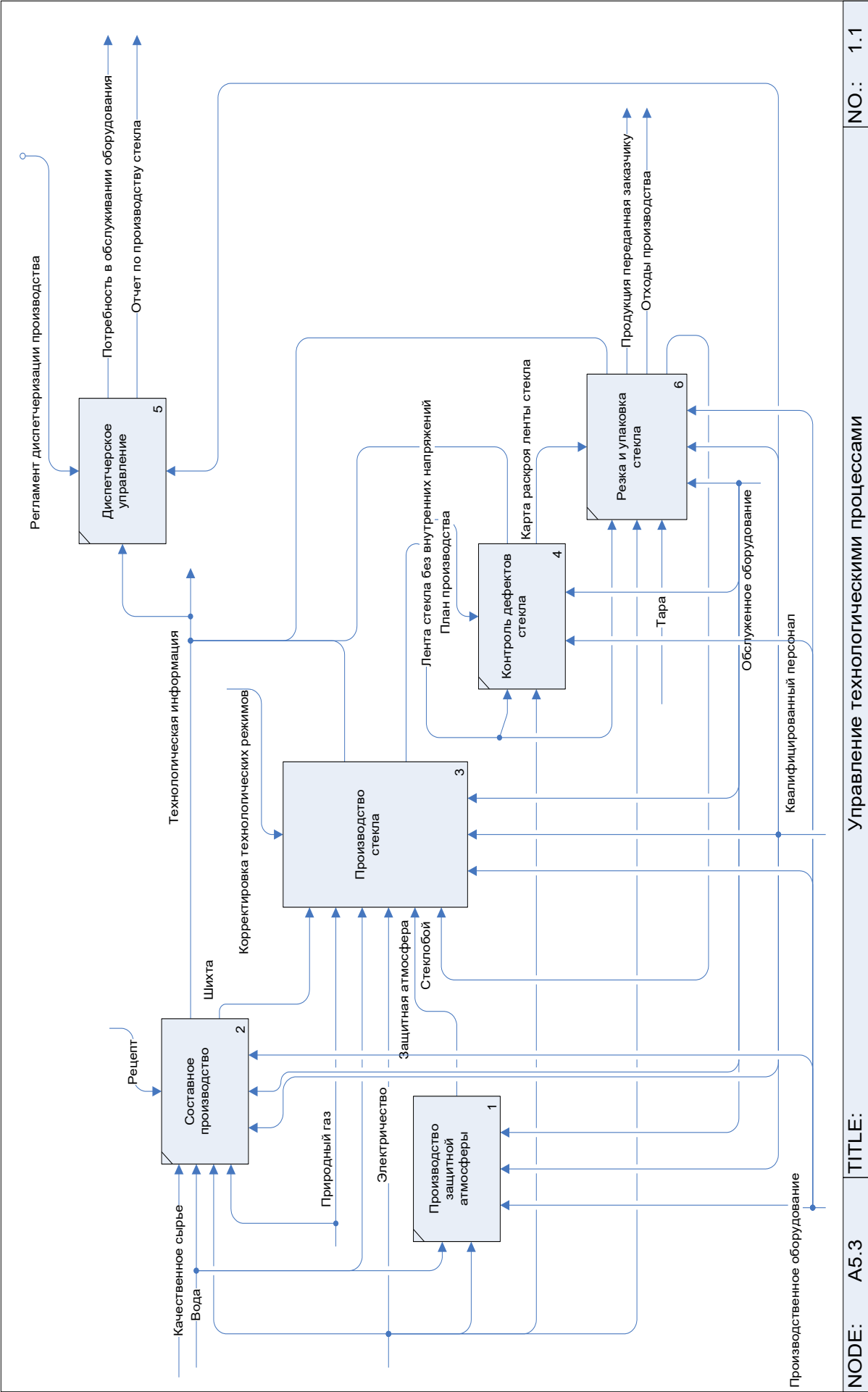


Рисунок 2.13 - Диаграмма A5.3. «Управление технологическими процессами»

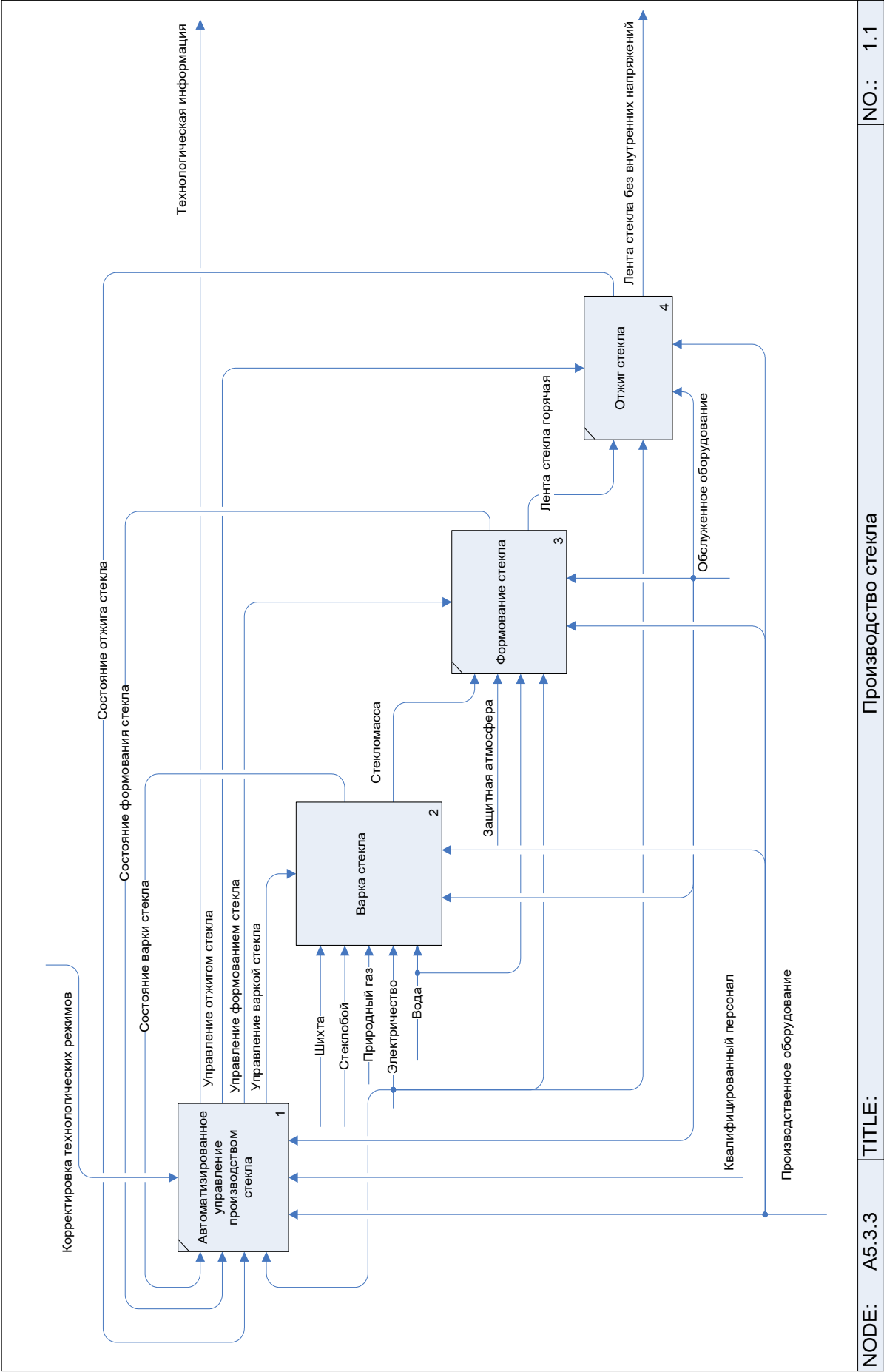


Рисунок 2.14 - Диаграмма A5.3.3 «Производство стекла»

1) длительное пребывание стекла на складе ведет к снижению скорости оборотных средств;

2) увеличение простоя основного технологического оборудования в процессе изменения технологических режимов при переходе с выпуска стекла одного типа на другой из-за неоптимального планирования производства заказов;

3) увеличение выпуска некачественного листового стекла при изменении состава сырьевых материалов;

4) отсутствие у производственного персонала закрепленных навыков и опыта по предотвращению аварийных ситуаций и действиям по минимизации ущерба от аварийных ситуаций на производстве листового стекла.

Анализ перечисленных выше проблем позволяет определить цель управления производственными процессами сложной химико-технологической системы производства листового стекла как автоматизированное управление энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла в режиме реального времени на основе использования компьютерного моделирования для поддержки принятия управленческих решений.

Решение задач автоматизированного управления цифровизированными организационно-техническими процессами многостадийного производства листового стекла как сложной химико-технологической системы базируется на прогрессе в области разработки технологий цифровизации, машинного обучения, формализации и моделирования бизнес-процессов, постоянного развития аппаратных и программных средств автоматизации в промышленности.

Задачи управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла:

1. Разработка математических моделей химико-технологических процессов многостадийного производства листового стекла.

2. Разработка на основе математических моделей компьютерных моделей химико-технологических процессов многостадийного производства высококачественного листового стекла
3. Проведение экспериментов с компьютерными моделями химико-технологических процессов для повышения их адекватности.
4. Внедрение программного обеспечения компьютерных моделей химико-технологических процессов в состав автоматизированной системы управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла.

2.2. Нейросетевая модель автоматизированного управления составом стекольной шихты как источника возникновения дефектов листового стекла

На предприятиях стекольной промышленности показатели качества шихты оцениваются по данным лабораторного анализа. Качество полученных результатов непосредственно зависит от лабораторного оборудования (тип, состояние), человеческого фактора (квалификация, опыт, добросовестность) и качества отобранных проб. Технические возможности лабораторного контроля позволяют сделать от одного (химический метод) до трех (рентгеноспектральный метод) анализов за смену. При производительности современных дозирочно-смесительных линий (ДСЛ) 500 – 600 т/сутки количество отвесов достигает 180 штук в смену, при этом контролю подвергаются только 1.6% отвесов шихты. Несвоевременность выполнения контроля технологических характеристик процесса приготовления шихты влияет на оперативность принятия решений по коррекции режима работы технологического оборудования [333].

Важнейшим фактором производства высокоэффективного функционального стекла является применение качественной стекольной шихты. Главными показателями качества стекольной шихты являются: «соответствие химического состава» рецепту и соответствие заданному

составу во всех микрообъемах одного отвеса (однородность), влажность и температура шихты [333, 334]. На основе первого «соответствие химического состава» вводится понятие категории стекольной шихты по допустимым отклонениям от теоретического рецепта: 1) до 0,6%; 2) 0,6–0,7%; 3) 0,7–0,85%; 4) более 0,85% (брак).

Незначительные отклонения от рецепта приводят к нарушениям варки и формования стекла, появлению пороков в нем. В частности, при увеличении содержания песка удлиняется протяженность зоны шихты в бассейне стекловаренной печи, при этом изменяется температурный режим печи. При увеличении содержания соды или недостаточном количестве сульфата натрия удлиняется зона пены и т.п.

Основными причинами, вызывающими отклонения в составе шихты, являются колебания химического состава сырья и ошибки дозирования [335, 336]. Кроме того, оказывают влияние влажность сырья и гранулометрический состав соды. Повышение влажности сырьевого материала приводит к уменьшению основного вещества в отвесе и, следовательно, к отклонениям от рецепта. Наличие большого числа крупных фракций соды приводит к ошибкам при проведении лабораторных анализов шихты.

Соответствие шихты рецепту определяется соотношениями:

$$S1=f_1(c1,..., c4, d1,..., d4), \quad (2.1)$$

где $S1$ – отклонение от заданного химического состава по нерастворимому остатку (оксиду кремния); $c1, c2, c3, c4$ – содержание SiO_2 в песке, доломите, карбонате кальция и полево шпате, соответственно; $d1, d2, d3, d4$ – ошибки дозаторов песка, доломита, карбоната кальция и полевого шпата, соответственно;

$$S2=f_2(c5, g1, g2, g3, h1, d5, d6), \quad (2.2)$$

где $S2$ – отклонение от заданного химического состава по соде; $c5$ – содержание Na_2CO_3 в соде; $g1, g2, g3$ – гранулометрический состав соды, сита № 2К, № 08, № 063, соответственно; $h1$ – влажность соды; $d5, d6$ – ошибки дозаторов сульфата натрия и соды, соответственно;

$$S3=f_3(c6, c7, h2, h3, d2, d3), \quad (2.3)$$

где $S3$ – отклонение от заданного химического состава по сумме карбонатов кальция и магния; $c6, c7$ – содержание CaCO_3 и MgCO_3 в карбонате кальция, соответственно; $h2, h3$ – влажность карбоната кальция и доломита, соответственно; $d2, d3$ – ошибки дозаторов доломита и карбоната кальция, соответственно;

$$S4=f_4(h4, d5), \quad (2.4)$$

где $S4$ – отклонение от заданного химического состава по сульфату натрия; $h4$ – влажность сульфата натрия; $d5$ – ошибка дозатора сульфата натрия [337, 343].

Качество смешивания шихты (однородность) зависит от гранулометрического состава, влажности и температуры сырьевых материалов. При большом различии в зерновом составе сырьевых материалов увеличивается склонность к расслоению и комкованию готовой шихты. Шихта с нормальной влажностью не пылит, менее подвержена расслоению, так как имеет место слипание частиц. При температуре ниже 35°C происходит комкование шихты, так как моногидрат соды $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ превращается в декагидрат $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [240, 338, 339]. Расслоение шихты и ее неоднородность вызывают неравномерное проваривание и затрудняют усреднение больших объемов стекломассы и, как следствие, приводят к появлению таких пороков как свили и шихтные камни.

Повысить оперативность контроля показателей качества шихты возможно с использованием прогностических математических моделей на основе аппарата искусственных нейронных сетей [340 – 342], которые создаются на основе автоматически и лабораторно измеряемых значений параметров сырьевых материалов. Эти модели прогнозируют показатели качества шихты по фактическим данным о сырье (гранулометрический и химический состав, влажность, температура, ошибки дозирования). Выбор ИНС как инструмента математического моделирования обусловлен тем, что между входами и выходами технологического процесса неизвестен точный вид

математических зависимостей, а ИНС обладают способностью к выявлению и обобщению скрытых математических связей. Использование ИНС обеспечивает нахождение такой аппроксимации, которая позволяет получать выходное значение в зависимости от входных значений и оценить степень точности аппроксимации.

2.3. Математическая модель химико-технологического процесса формирования движущейся ленты стекла

Процесс формирования листового стекла методом флоат-процесса заключается в придании заданных физических характеристик толщины и ширины стекломассе, поступающей из стекловаренной печи на расплав олова при непрерывном горизонтальном вытягивании из ванны расплава валами печи отжига [356]. Схема технологического процесса формирования листового стекла в ванне расплава представлена на рисунке 2.15 (виды сбоку и сверху) [356].

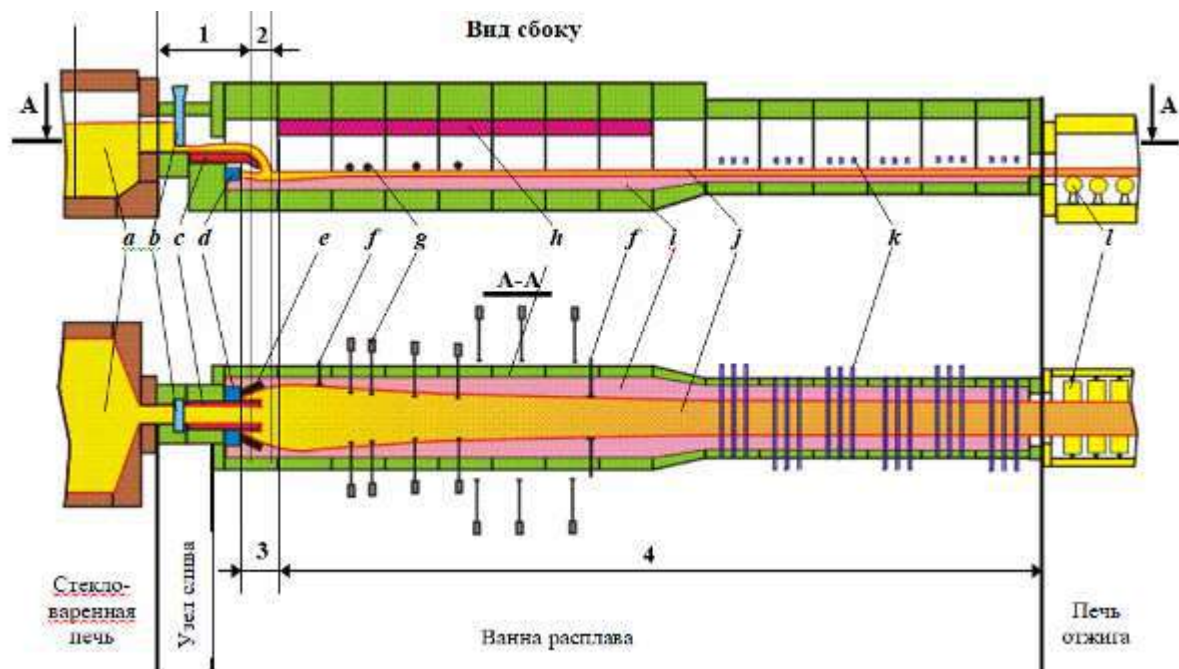


Рисунок 2.15 - Схема технологического процесса формирования листового стекла [356]

На рисунке 2.15 латинскими буквами обозначено: *a* – стекломасса в стекловаренной печи, *b* – дозирующий шибер, *c* – носик узла слива, *d* –

смачиваемый брус, e – рестриктор, f – ограничители растекания ленты стекла, g – бортоформующая машина, h – нагреватель, i – расплав олова, j – лента стекла, k – холодильник, l – валы печи отжига.

В управлении формированием стекла методом флоат-процесса используются следующие органы управления технологическим процессом: дозирующий шибер (регулирует высоту щели дозирования стекломассы из стекловаренной печи); система нагревателей и холодильников (обеспечивает заданное температурное поле в ванне расплава); система подачи защитной атмосферы в ванну расплава (поддерживает заданное давление и распределение химического состава защитной атмосферы по длине ванны расплава); от 1 до 7 и более пар бортоформующих машин (заставляют ленту стекла изменять толщину больше или меньше равновесной равной 6 мм); ограничители растекания ленты стекла (обеспечивают центрирование ленты стекла относительно оси ванны расплава); валы печи отжига (определяют скорость вытягивания ленты стекла).

В работах [262 – 265, 344 – 352] рассматриваются результаты моделирования формирования листового стекла, однако они обладают недостаточной степенью формализации, что ограничивает возможности их использование для моделирования растекания стекломассы под воздействием бортоформующих машин и конвейера отжига листового стекла.

Для автоматизированного управления технологическим процессом формирования ленты стекла методом флоат-процесса и его визуализации в динамике на персональном компьютере необходимо построение комплексной математической модели, предполагающей следующие составные компоненты:

- 1) модель вязкости стекла;
- 2) модель воздействия бортоформующих машин на ленту стекла.

Далее описаны только математические модели вязкости стекла и тепломассопереноса в стекле.

Рассмотрим первую модель. Распределение вязкости стекла вдоль ванны расплава существенно влияет на формирование ленты методом флоат-

процесса, поэтому необходимо для заданного химического состава построить функцию распределения вязкости стекла по температуре $\mu = \mu(T(x))$. Температура стекла по длине ванны расплава (50 метров) изменяется от 1100°C до 600°C, при этом величина коэффициента вязкости стекла меняется от 1,0 кПа*с до 10,0 ГПа*с [353]. Вязкость стекла зависит от его химического состава. Для листовых стекол он следующий: SiO₂ –72,0%; Na₂O –13,2%; CaO –8,8%; MgO –3,7%; Al₂O₃ –1,0%; SO₃ – 0,5%; Fe₂O₃ – 0,1%. Методика [353] позволяет по химическому составу стекла для 11 заданных значений коэффициента вязкости μ_i и температуры $T_i (i = \overline{1, 11})$ для каждого интервала температур $[T_i, T_{i+1}] (i = \overline{1, 10})$ построить интерполирующую функцию

$$\lg \mu = A_i + \frac{B_i}{T^{C_i}} \quad (i = \overline{1, 10}), \quad (2.5)$$

где μ – коэффициент вязкости стекла; T – температура стекла; A_i, B_i, C_i – коэффициенты, значения которых вычисляются из условий: для $T_i (i = \overline{2, 10})$ значения μ , вычисленные по формуле (1), совпадают с рассчитанными ранее значениями μ . При этих значениях производные $d\mu/dT$ остаются непрерывными. В результате по формуле (1) можно вычислить значение коэффициента вязкости μ для любой температуры T из интервала 600 -1100°C. В формуле (2.6) используется шкала абсолютных температур.

На формование стекла в ванне расплава оказывают воздействие следующие факторы: 1) вязкость стекла; 2) положение дозирующего шибера; 3) температурное поле в ванне расплава, определяемое температурой стекломассы, поступающей из стекловаренной печи, а также режимом работы системы нагревателей и холодильников; 4) количество, скорость и положение (т.е. угол между осью бортоформирующей машины и нормалью к боковой стенке ванны расплава и глубина погружения внутрь поверхности ленты стекла) бортоформирующих машин; 5) скорость вытягивания ленты стекла валами печи отжига; 6) давление, состав и распределение защитной атмосферы по длине ванны расплава.

Движение ленты стекла в ванне расплава можно разделить на четыре области в зависимости от особенностей движения (см. рисунок 2.15):

- область, примыкающая к дозирующему шиберу, и прямолинейный участок носика узла слива, где движение расплава стекла зависит от уровня стекломассы в стекловаренной печи и от положения шибера, регулирующего высоту щели, через которую происходит дозирование поступления стекломассы в ванну расплава (область 1);
- область движения расплава стекла по криволинейному участку носика узла слива и свободного падения на расплав олова (область 2);
- область растекания расплава стекла на расплаве олова с учетом взаимодействия со смачиваемым брусом и рестрикторами (ограничителями растекания стекломассы) (область 3);
- область формования ленты стекла в зависимости от распределения температуры вдоль ленты стекла под воздействием бортоформирующих машин и валов печи отжига (область 4).

В работе [347] представлена математическая модель формования стекла для прямого вытягивания (без учета воздействия бортоформирующих машин) и заданной вязкости. Рассмотрим движение ленты стекла в области 4 ванны расплава с заданным химическим составом с учетом воздействия бортоформирующих машин и валов печи отжига. Поток расплава моделируется неньютоновской жидкостью [354, 355] с заданным законом изменения коэффициента вязкости. Для описания математической модели формования ленты стекла при ее движении по поверхности расплавленного олова в области 4 вводится декартова система координат $Ox^*y^*z^*$, показанная на рисунке 2.16.

Здесь ось Ox^* направлена по горизонтали вдоль направления движения ленты стекла; ось Oy^* - по вертикали вверх; при этом плоскость Ox^*y^* располагается в плоскости симметрии ленты стекла. В начальном сечении (при $x^* = x_0^*$) через U_0 обозначается скорость движения ленты стекла; через $2b$, H_0 , μ_0 - ширина, толщина ленты и динамический коэффициент вязкости стекла в

этом сечении, соответственно. Через h_0 обозначается равновесная толщина ленты, которая определяется силами тяжести и поверхностного натяжения.

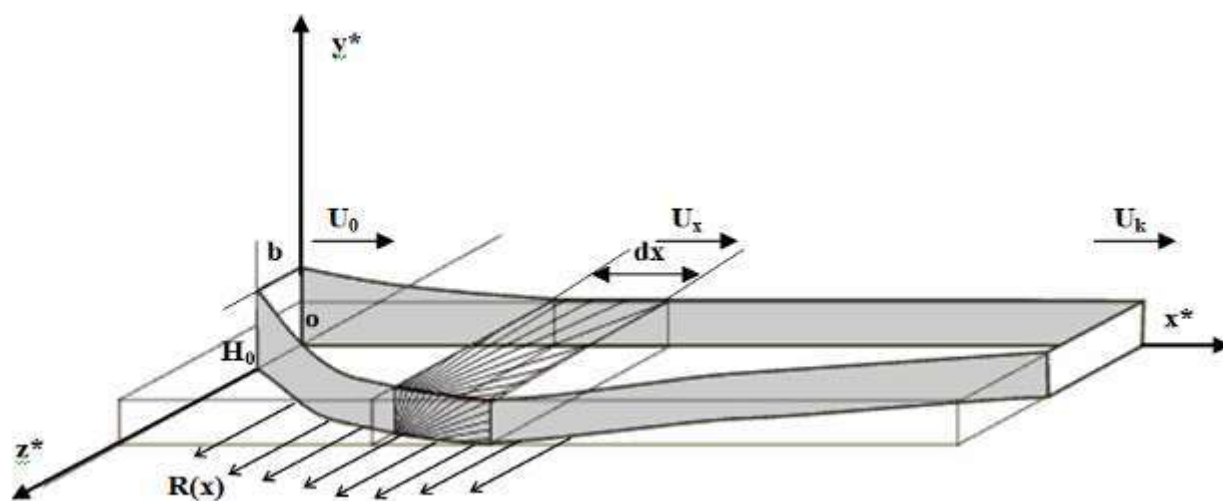


Рисунок 2.16 - Схема движения ленты стекла в области 4 ванны расплава (половина ленты стекла относительно плоскости Ox^*y^*)

Введем безразмерную координату сечения ленты стекла $x=x^*/b$, безразмерную толщину $f(x)=y^*/h_0$, безразмерную полуширину $\psi(x)=z^*/b$ и безразмерную продольную составляющую скорости движения ленты стекла $\phi(x)=U_x/U_0$ в этом сечении.

Стекломасса в ленте стекла в области 4 рисунка 2.15 движется под действием сил давления, вязкости, тяжести, поверхностного натяжения и растяжения ленты, которые создаются бортоформирующими машинами. Уравнения движения ленты составляются на основе закона сохранения массы и условий равновесия между перечисленными выше силами. Система уравнений движения ленты стекла в безразмерных переменных в форме Коши имеет вид:

$$\begin{aligned}\phi'(x) &= \frac{m(x)}{f(x)} \left(\frac{C}{\psi(x)} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} f^2(x) \right); \\ \psi'(x) &= \frac{m(x)\psi(x)}{f(x)\phi(x)} \left(R(x) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} f^2(x) \right); \\ f'(x) &= \frac{m(x)}{\phi(x)} \left(1 - R(x) - \frac{C}{\psi(x)} - f^2(x) \right),\end{aligned}\tag{2.6}$$

где $m(x) = \frac{1}{2B\eta(x)}$, $R(x) \neq \frac{1}{2}$ – заданные характерные функции; штрих обозначает дифференцирование по x .

Уравнения (2.6) определяют для $x \in [x_0, x_k] \equiv X$ движение стекломассы под действием сил давления, вязкости, тяжести, поверхностного натяжения и растяжения ленты, создаваемого бортоформирующими машинами и транспортером туннельной печи отжига стекла.

В системе уравнений (2.6) обозначено: $R(x)$ – безразмерное напряжение растягивающих усилий, создаваемых бортоформирующими машинами, действующих в направлении оси Oz^* ; $\eta = \eta(x) = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu(T(x))}{\mu(T(x_0))} - \eta = \eta(x) = \mu/\mu_0 = \mu(T(x))/\mu(T(x_0))$ – относительный коэффициент вязкости расплава; через $B = U_0\mu_0(\gamma_c h_0 b)^{-1}$ – безразмерная постоянная, в которой γ_c – удельный вес стекломассы; B, C – отличные от нуля заданные безразмерные постоянные. Постоянная C , входящая в систему уравнений (2.6), определяется в результате решения краевой задачи, формулируемой ниже.

Все указанные зависимости, в том числе и зависимость вида $T=T(x)$, являются непрерывными функциями, заданными для $x \in X$.

Для системы уравнений (2.6) в начальном сечении $x=x_0$ заданы условия [356]

$$\phi(x_0) = 1, \psi(x_0) = 1, f(x_0) = \frac{H_0}{h_0}. \quad (2.7)$$

и для $x_0 < x < x_k$ задана зависимость вида

$$\eta = \eta(x) = \mu(T(x)) / \mu(T(x_0)). \quad (2.8)$$

В конечном сечении $x = x_k$ валами печи отжига навязывается скорость движения ленты стекла U_k . Тогда в этом сечении должно выполняться условие при $x=x_k$

$$\phi(x) = U_k/U_0. \quad (2.9)$$

Таким образом, решение задачи о растекании расплава стекла по горизонтальной плоскости сводится к решению задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (2.6) с граничными условиями (2.7) в

начальном сечении $x=x_0$ и условием неразрывности потока (непрерывности) (2.8) в конечном сечении $x=x_k$. При решении задачи полагается, что вдоль ленты стекла заданы непрерывные зависимости $R=R(x)$, $T=T(x)$.

Ограниченная задача Коши (приближенное решение). Выделим участок потока расплава стекла $x \in [x_1, x_2] \equiv X_* \subset X$ (рисунок 2.16), в точках которого выполняется условие $0 < y^* < h_0$. Тогда имеем

$$0 < f(x) < 1 \quad (x \in X_*). \quad (2.10)$$

Условие (2.10) является основой для нахождения приближенного решения задачи Коши (2.6), (2.7) методом последовательных приближений (методом итераций). Это условие позволяет в уравнениях системы (2.6) пренебречь величиной $f^2(x)$ по сравнению с остальными слагаемыми, содержащимися в правых частях этих уравнений. В результате упрощенная система уравнений движения принимает вид

$$\begin{aligned} \phi'(x) &= \frac{m(x)}{f(x)} \left[\frac{C}{\psi(x)} - \frac{1}{2} \right], \\ \psi'(x) &= \frac{m(x)\psi(x)}{f(x)\phi(x)} \left[R(x) - \frac{1}{2} \right], \\ f'(x) &= \frac{m(x)}{\phi(x)} \left[1 - R(x) - \frac{C}{\psi(x)} \right]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Совокупность уравнений (2.11) аппроксимирует для $x \in X_*$ исходную систему (2.6) при ограничении (2.10) и позволяет получить начальное приближение решения поставленной задачи.

Задача Коши (2.11), (2.7) является ограниченной задачей по отношению к соответствующей задаче (2.6), (2.7), поставленной при ограничении (2.10).

Представим первое и третье уравнения системы (2.11) в виде

$$\begin{aligned} f(x)\phi'(x) &= m(x) \left[\frac{C}{\psi(x)} - \frac{1}{2} \right], \\ f'(x)\phi(x) &= m(x) \left[1 - R(x) - \frac{C}{\psi(x)} \right]. \end{aligned}$$

Складывая данные уравнения между собой почленно, получаем интегрируемую комбинацию для системы уравнений (2.11)

$$[f(x)\phi(x)]' = m(x) \left[\frac{1}{2} - R(x) \right] \equiv \Phi(x), \quad (2.12)$$

где функция $\Phi(x)$ задана априорно для $x \in X_*$.

Из соотношения (2.12) следует

$$f(x)\phi(x) = f(x_0)\phi(x_0) + \int_{x_0}^x \Phi(s)ds. \quad (2.13)$$

Равенство (2.13) является первым интегралом системы уравнений (2.11), в силу которого порядок этой системы может быть понижен на единицу.

Обозначим выражение

$$F(x) = -\frac{\Phi(x)}{f(x)\phi(x)}, \quad (2.14)$$

в котором вместо величины $f(x)\phi(x)$ подставлена правая часть равенства (2.13). Тогда второе уравнение системы (2.11) принимает вид

$$\psi'(x) = F(x)\psi(x), \quad (2.15)$$

где в силу соотношений (2,7), (2.13), (2.14) имеем

$$F(x) = -\Phi(x) \left[\frac{H_0}{h_0} + \int_{x_0}^x \Phi(s)ds \right]^{-1}. \quad (2.16)$$

Из уравнения (16) в силу начального условия (2.7) для $\psi(x)$ следует

$$\psi(x) = \exp \int_{x_0}^x F(s)ds \equiv \Psi(x), \quad (2.17)$$

где величина $F(x)$ определяется равенством (2.16).

Из первого уравнения системы (2.11) и интеграла (2.13) с учетом начального условия (2.7) для $\phi(x)$ и выражения (2.16) в результате интегрирования находим

$$\phi(x) = \exp \int_{x_0}^x \left[\frac{c}{\psi(s)} - \frac{1}{2} \right] \cdot \left[R(s) - \frac{1}{2} \right]^{-1} F(s) ds. \quad (2.18)$$

В силу найденных зависимостей $\phi(x)$, $\psi(x)$ из третьего уравнения системы (2.11) с учетом начального условия (2.7) для $f(x)$ в результате интегрирования получаем

$$f(x) = \frac{H_0}{h_0} + \int_{x_0}^x \frac{m(s)}{\phi(s)} \left[1 - R(s) - \frac{c}{\psi(s)} \right] ds. \quad (2.19)$$

Здесь зависимость $\phi(x)$ определяется выражением (2.18).

Итерационный процесс. Решение ограниченной задачи, определяемое соотношениями (2.17) – (2.19) при ограничении (2.10), примем в качестве первого приближения в итерационном процессе нахождения решения поставленной задачи для исходной системы уравнений (2.6) [357]. В качестве средства, приводящего к уточнению полученного приближенного решения, применим алгоритм метода последовательных приближений (метода итераций) Пикара-Линделёфа [358].

Представим систему уравнений (2.6) в следующей эквивалентной форме

$$\begin{aligned}\phi'(x) &= m(x) \left[\left(\frac{C}{\psi(x)} - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{f(x)} + \frac{1}{2} f(x) \right], \\ \psi'(x) &= m(x) \frac{\psi(x)}{\phi(x)} \left[\left(R(x) - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{f(x)} + \frac{1}{2} f(x) \right], \\ f'(x) &= \frac{m(x)}{\phi(x)} \left[1 - R(x) - \frac{C}{\psi(x)} - f^2(x) \right].\end{aligned}\quad (2.20)$$

Пусть $(\phi_1(x), \psi_1(x), f_1(x))$ – решение ограниченной задачи (2.11), (2.7), принимаемое за первое итерационное приближение. Тогда в силу системы уравнений (2.20) и начальных условий (2.7) решение исходной задачи во втором приближении примет вид

$$\begin{aligned}\phi_2(x) &= 1 + \int_{x_0}^x \left[\left(\frac{C}{\psi_1} - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{f_1} + \frac{1}{2} f_1 \right] m(s) ds, \\ \psi_2(x) &= 1 + \int_{x_0}^x \left[\left(R - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{f_1} + \frac{1}{2} f_1 \right] \frac{\psi_1}{\phi_1} m(s) ds, \\ f_2(x) &= \frac{H_0}{h_0} + \int_{x_0}^x \left(1 - R - \frac{C}{\psi_1} - f_1^2 \right) \frac{m(s)}{\phi_1} ds.\end{aligned}\quad (2.21)$$

В равенствах (2.21) и всюду далее нижний числовой индекс при величинах ϕ, ψ, f указывает номер (порядок) приближения к точному значению данной величины.

Повторяя указанную рекуррентную процедуру, получим соотношения, определяющие приближение порядка $n \geq 3$ для решения поставленной задачи

$$\phi_n(x) = 1 + \int_{x_0}^x \left[\left(\frac{C}{\psi_{n-1}} - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{f_{n-1}} + \frac{1}{2} f_{n-1} \right] m(s) ds,$$

$$\begin{aligned}\psi_n(x) &= 1 + \int_{x_0}^x \left[\left(R - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{f_{n-1}} + \frac{1}{2} f_{n-1} \right] \frac{\psi_{n-1}}{\phi_{n-1}} m(s) ds, \\ f_n(x) &= \frac{H_0}{h_0} + \int_{x_0}^x \left(1 - R - \frac{C}{\psi_{n-1}} - f_{n-1}^2 \right) \frac{m(s)}{\phi_{n-1}} ds.\end{aligned}\quad (2.22)$$

Соотношения (2.22) позволяют получить решение поставленной задачи с любой требуемой точностью.

Рассмотрим вопрос о выполнении условий теоремы Пикара-Линделёфа, являющейся основой для реализации алгоритма итераций.

Согласно физическому смыслу величин $\phi(x)$, $\psi(x)$, $f(x)$ эти функции являются знакоположительными, непрерывными и ограниченными для $x \in X_*$. Предполагается, что правые части уравнений системы (2.20) также непрерывны всюду на множестве X_* . Тогда эти части являются функциями, ограниченными на данном множестве. Покажем, что если свойство ограниченности данных функций относится к их приближению порядка $n-1$, то оно распространяется и на приближение порядка n .

Пусть в силу свойства ограниченности для $x \in X_*$

$$\begin{aligned}0 < m(x) < m_*, \quad 0 < R(x) < R_*, \quad 0 < a_1 < \phi_{n-1}(x) < a_2, \dots \\ 0 < b_1 < \psi_{n-1}(x) < b_2, \quad 0 < g_1 < f_{n-1}(x) < g_2,\end{aligned}\quad (2.23)$$

где m_* , R_* , a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , g_1 , g_2 – заданные числа. Тогда, согласно оценкам (2.23) имеем

$$\frac{1}{\phi_{n-1}(x)} < a_1, \quad \frac{1}{\psi_{n-1}(x)} < b_1, \quad \frac{1}{f_{n-1}(x)} < g_1$$

и из соотношений (2.22) следует

$$\begin{aligned}\phi_n(x) &< 1 + \int_{x_0}^x \left[\left(b_1 C + \frac{1}{2} \right) g_1 + \frac{1}{2} g_2 \right] m_* ds < 1 + \left[\left(b_1 C + \frac{1}{2} \right) g_1 + \frac{1}{2} g_2 \right] C_* < a_2 + \alpha_n, \\ \psi_n(x) &< 1 + \int_{x_0}^x \left[\left(R_* + \frac{1}{2} \right) g_1 + \frac{1}{2} g_2 \right] a_1 b_2 m_* ds < 1 + \left[\left(R_* + \frac{1}{2} \right) g_1 + \frac{1}{2} g_2 \right] a_1 b_2 C_* < b_2 + \beta_n, \\ f_n(x) &< \frac{H_0}{h_0} + \int_{x_0}^x (1 + R_* + b_1 C + g_2^2) a_1 m_* ds < \frac{H_0}{h_0} + (1 + R_* + b_1 C + g_2^2) a_1 C_* < g_2 + \gamma_n.\end{aligned}\quad (2.24)$$

В соотношениях (2.24) $C_* = m_*(x_k - x_0)$, $(\alpha_n, \beta_n, \gamma_n) > 0$ – постоянные, такие, что

$$|\phi_n(x) - \phi_{n-1}(x)| < \alpha_n, \quad |\psi_n(x) - \psi_{n-1}(x)| < \beta_n, \quad |f_n(x) - f_{n-1}(x)| < \gamma_n.$$

Таким образом, функции, определяющие решение приближения порядка n , ограничены для $x \in X_*$.

Введем четырехмерное координатное пространство $\{x, \phi, \psi, f\}$ и рассмотрим расположенную в нем область D , удовлетворяющую условиям [359]

$$|x - x_0| \leq a, \quad |\phi(x) - \phi(x_0)| \leq h_1, \quad |\psi(x) - \psi(x_0)| \leq h_2, \quad |f(x) - f(x_0)| \leq h_3, \quad (2.25)$$

где $(a, h_i) > 0$ ($i=1,2,3$) – заданные числа. При этом точка $N_0[x_0, \phi(x_0), \psi(x_0), f(x_0)]$ расположена внутри области D . Полагаем, что соотношения (2.24) имеют место для любой точки $N[x, \phi(x), \psi(x), f(x)] \in D$. Предполагается также, что функции, являющиеся правыми частями уравнений системы (2.20), удовлетворяют условию Липшица по переменным $x, \phi(x), \psi(x), f(x)$ относительно двух произвольных точек области D .

Введем постоянные [359]

$$h_* = \max(h_1, h_2, h_3), \quad h = \min(a, \frac{h_*}{M}),$$

$$M = \max(a_2 + \alpha_n, b_2 + \beta_n, g_2 + \gamma_n), \quad (2.26)$$

заданные в силу набора чисел, входящих в соотношения (2.24), (2.25).

Согласно принятым предпосылкам, для системы уравнений (2.20) выполняются условия теоремы Пикара-Линделёфа, обеспечивающей существование и единственность решения $(\phi(x), \psi(x), f(x))$ задачи Коши (2.20), (2.7). При этом последовательности функций $\{\phi_n(x)\}, \{\psi_n(x)\}, \{f_n(x)\}$ ($n = 0, 1, \dots$), построенные согласно итерационным равенствам (2.22), сходятся равномерно для $x \in I \subset X$ к функциям $\phi(x), \psi(x), f(x)$, соответственно, принадлежащим классу C^1 и образующим решение системы уравнений (2.20), непрерывно зависящее от параметров данной задачи. Это решение заведомо определено на интервале $I(|x - x_0| \leq h)$, где h определяется равенством (2.26) и принадлежит области D .

В подразделе рассмотрена задача о растекании расплава стекла по горизонтальной плоскости, возникающем при формовании листового стекла

методом флоат-процесса. Введены ограничения задачи Коши при моделировании неньютоновской жидкости с заданным законом изменения коэффициента вязкости. Методом итераций найдены зависимости распределения геометрических параметров потока расплава по длине ленты стекла, а также продольный профиль скорости течения стекломассы.

2.4. Выводы

Раздел 2.1. Выполнен системный анализ ХТП многостадийного производства ВЛС как объектов автоматизированного управления. Определены комплексы задач управления (функциональные подсистемы) производством ВЛС. Предложен алгоритм системного анализа химико-технологического производства листового стекла как объекта автоматизированного управления. Решение задач автоматизированного управления цифровизированными организационно-техническими процессами многостадийного производства листового стекла как сложной химико-технологической системы базируется на прогрессе в области разработки технологий цифровизации, машинного обучения, формализации и моделирования бизнес-процессов, постоянное развитие аппаратных и программных средств автоматизации в промышленности. Определены задачи управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла:

Раздел 2.2. Разработана нейросетевая модель автоматизированного управления составом стекольной шихты как источника возникновения дефектов листового стекла на основе анализа отклонения от заданного химического состава: по нерастворимому остатку (оксиду кремния), по соде, по сумме карбонатов кальция и магния, по сульфату натрия. Полученная модель предназначена для прогнозирования и управления качеством стекольной шихты.

Раздел 2.3. Для комплексного подхода к решению задачи моделирования технологического процесса формования ленты стекла методом флоат-

процесса разработаны математические модели вязкости стекла и движения ленты стекла. Рассмотрена задача о растекании расплава стекла по горизонтальной плоскости, возникающем при формовании листового стекла методом флоат-процесса. Введены граничные условия для задачи Коши при моделировании неньютоновской жидкости с заданным законом изменения коэффициента вязкости.

ГЛАВА 3. ИНЖИНИРИНГ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

3.1. Компьютерная нейросетевая модель управления составом стекольной шихты

Задача аппроксимации функций (2.1 – 2.4) выполнена с помощью искусственных нейронных сетей в программной среде MATLAB 7 фирмы Mathworks. Для решения задач аппроксимации наиболее адекватными являются многослойные сети прямого распространения – двухмерные многослойные персептроны (MultiLayer Perceptron, MLP-сети) и двухмерные нейронные сети, использующие радиальные базисные функции (Radial Basis Function Network, RBF-сети) [340]. Нейросетевая модель соответствия шихты рецепту основана многослойном персептроне с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (Feed-forward backpropagation) [337, 343]. Величина выборки составляет 2188 значений.

В ходе многочисленных экспериментов выбрана MLP-сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (Feed-forward backpropagation). Обучение сети проводилось по алгоритму Левенберга – Марквардта (TRAINLM), относящегося к квазиньютоновским методам обучения. По сути, алгоритм является комбинацией метода Гаусса-Ньютона и метода градиентного спуска. Алгоритм Левенберга – Марквардта имеет эффективную реализацию в среде MATLAB, хотя и требует достаточно много памяти для хранения промежуточных результатов [340]. Для оценки качества обучения сети применен функционал средней суммы квадратов ошибки обучения (MSE)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2,$$

где N – величина выборки; e – разность между значениями выхода функции и выхода ИНС.

На основе широко известных рекомендаций определена первоначальная архитектура. Количество слоев – 2, количество нейронов в первом слое равно полусумме входов и выходов сети, во втором слое – 1. Функция активации нейронов первого слоя – сигмоидальная функция (logsig). Функция активации нейронов второго слоя – линейная функция (pureline). Для исключения переобучения сети выборки поделены на три множества: обучающее, контрольное и тестовое. Моделирование проводилось в среде MATLAB 7 фирмы Mathworks с использованием пакета Neural Networks Toolbox.

В ходе проведенных опытов для функций (2.1 – 2.4) наиболее эффективной оказалась ИНС, содержащая 2 скрытых слоя по 50 нейронов. Удовлетворительное значение функционала ошибки (2.5) достигнуто на 6-м цикле обучения и составило 0,0004 для обучающего множества и 0,001 для контрольного. Значение функционала ошибки равно $9,3 \cdot 10^{-6}$ для обучающего множества и $7,3 \cdot 10^{-4}$ – для контрольного достигнуто на 100-м цикле обучения.

Характеристики ИНС и результаты обучения модели соответствия шихты рецепту приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Характеристики ИНС и результаты обучения

Характеристика модели	Значение
Входов	30
Выходов	4
Скрытых слоев	2
Нейронов в 1 скрытом слое	50
Нейронов во 2 скрытом слое	50
Значение функционала ошибки на обучающем множестве	0.0004
Значение функционала ошибки на тестовом множестве	0.001
Потребовалось циклов обучения	6

Результаты обучения ИНС для (2.1 – 2.4) иллюстрируют рисунок 3.1. В левой части рисунка 3.1 расположены графики зависимости ошибки от номера цикла обучения для обучающего, контрольного и тестового множества, а в правой части – результаты линейного регрессионного анализа для обучающего, контрольного, тестового множества и общей совокупности

выборки (вид выходных значений ИНС, коэффициенты корреляции, уравнения линейной регрессии).

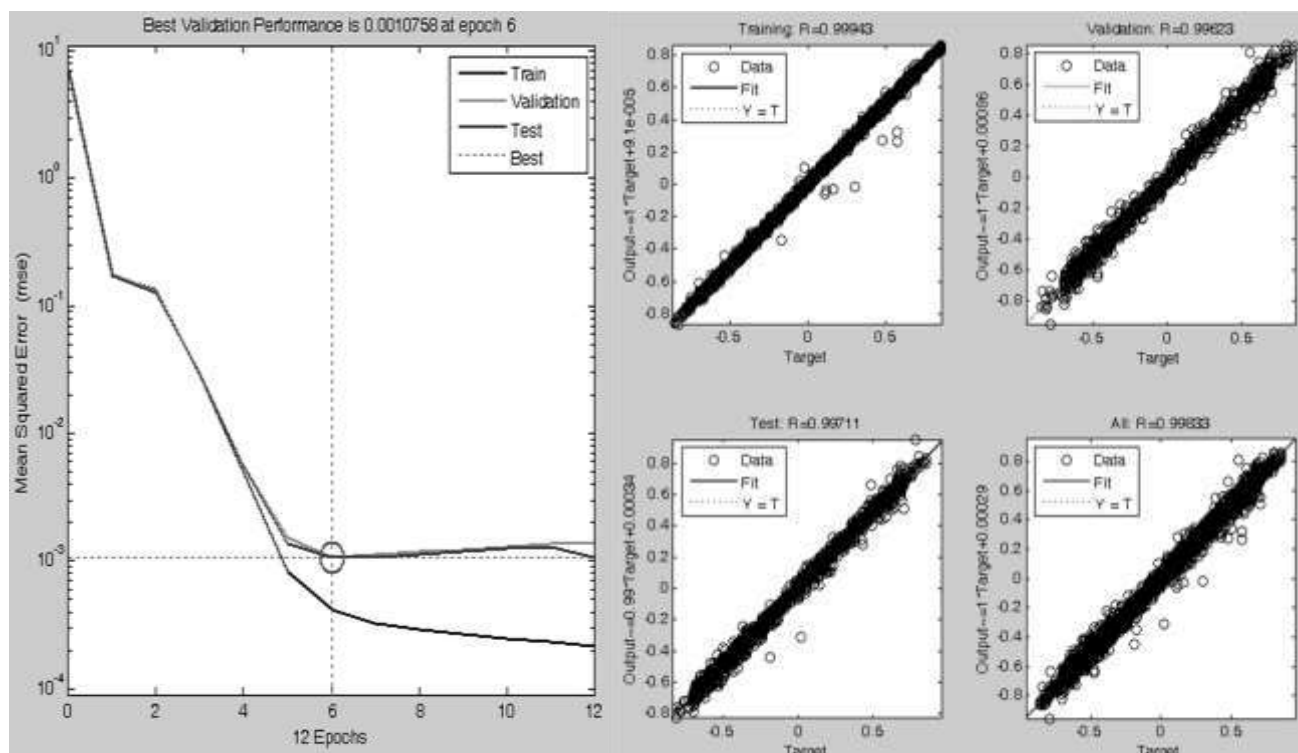


Рисунок 3.1. Результаты обучения ИНС модели соответствия шихты рецепту

Компьютерная реализация предложенной модели соответствия шихты рецепту в виде ИНС использована в единой информационно-аналитической системы предприятия (ЕИАС) [360]. В основные задачи ЕИАС входят: сбор, архивация и обработка технологической информации из подразделений предприятия; мониторинг и анализ режимов функционирования технологических процессов; генерация отчетов о работе производств, выработка рекомендаций по повышению качества продукции. ЕИАС реализована на основе компонентов программно-инструментального комплекса SIMATIC IT Historian и Report Manager (Siemens) [496]. Комплекс SIMATIC IT Historian - это мощный инструмент определения различных технико-экономических показателей ТП. Благодаря поддержке технологического стандарта COM (Component Object Model) кроме стандартных методов обработки данных (вычисление среднего, дисперсии, минимального/максимального значений) имеется возможность подключать

пользовательские программы, реализующие специальные алгоритмы обработки. Стандарт СОМ позволяет организовать соединение между программой-клиентом и компонентом другой программы в условиях изолированности друг от друга в операционной системе. Компонента СОМ перехватывает вызовы со стороны программы-клиента и адресует их компоненту другой программы, оставаясь полностью прозрачным для обеих.

Разработанное приложение ChargeNeuroQuality (CNQ) автоматически обращается к SIMATIC IT Historian и получает оперативные и исторические данные, необходимые для вычислений, обрабатывает их в соответствии с разработанными алгоритмами управления и записывает результаты в тэги SIMATIC IT Historian [496].

Для управления качеством стекольной шихты разработан алгоритм управления соответствием состава шихты рецепту. На рисунке 3.2 показана блок-схема нейросетевого алгоритма управления соответствием состава шихты рецепту.

На рисунке 3.2 использованы обозначения:

$c1, c2, c3, c4$ – содержание SiO_2 в песке, доломите, карбонате кальция и полевом шпате, соответственно;

$d1, d2, d3, d4$ – ошибки дозаторов песка, доломита, карбоната кальция и полевого шпата, соответственно;

$g1, g2, g3$ – гранулометрический состав соды, сита № 2К, № 08, № 063, соответственно;

$h1$ – влажность соды;

$d5, d6$ – ошибки дозаторов сульфата натрия и соды, соответственно;

$c6, c7$ – содержание CaCO_3 и MgCO_3 в карбонате кальция, соответственно;

$h2, h3$ – влажность карбоната кальция и доломита, соответственно;

$d2, d3$ – ошибки дозаторов доломита и карбоната кальция, соответственно;

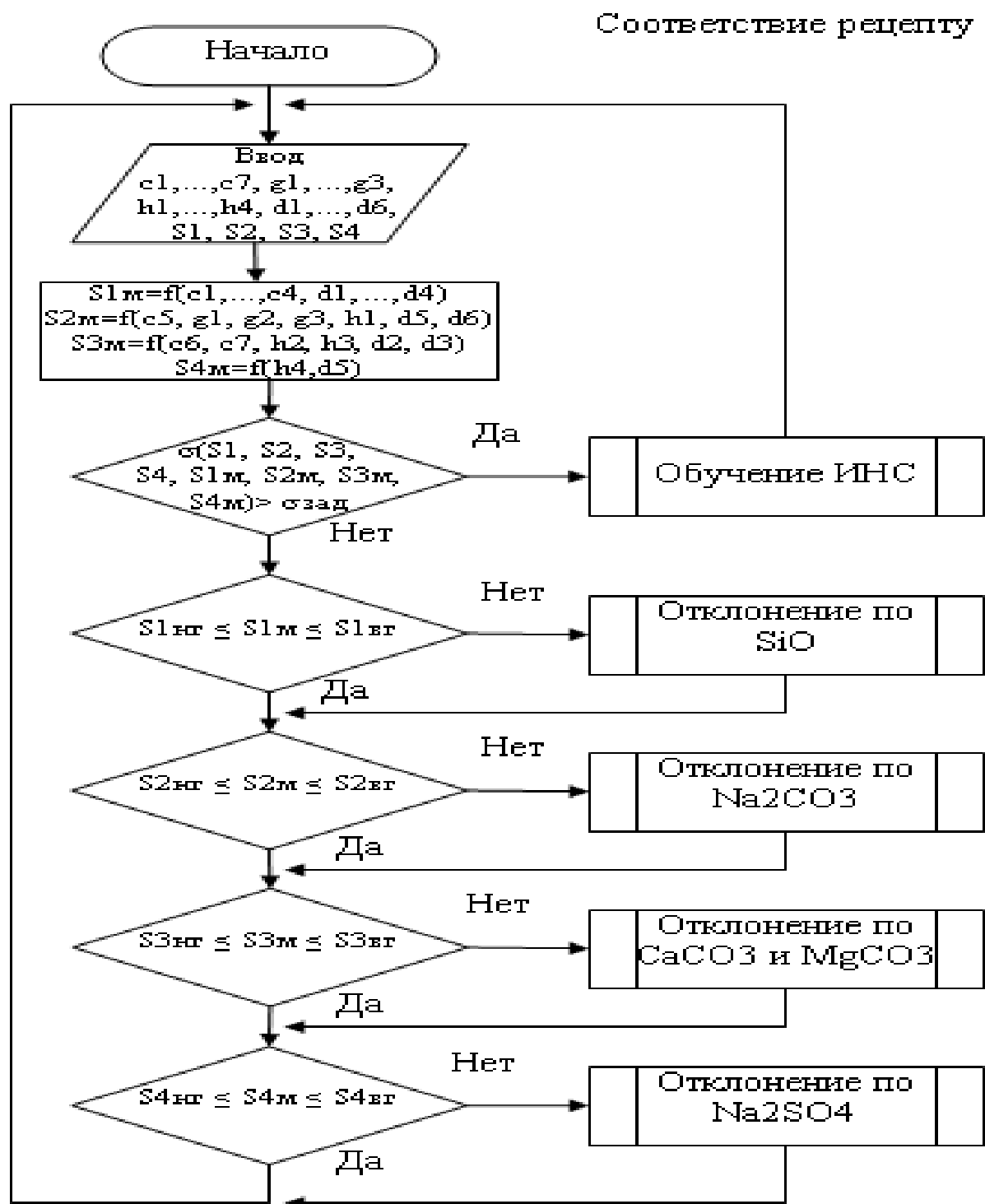


Рисунок 3.2 - Блок-схема нейросетевого алгоритма управления соответствия состава шихты рецепту

На рисунке 3.3 приведена блок-схема подпрограммы «Отклонение по SiO» алгоритма управления соответствия состава шихты рецепту. Результаты работы приложения ChargeNeuroQuality конечный пользователь получает в виде отчетов, созданных в Report Manager, графиков и гистограмм, которые

доступны для просмотра в клиентском программном обеспечении Historian Data Display. Сформированные управляющие воздействия автоматически передаются в АСУ ТП приготовления шихты и при соответствующих настройках - на исполнительные устройства [493].

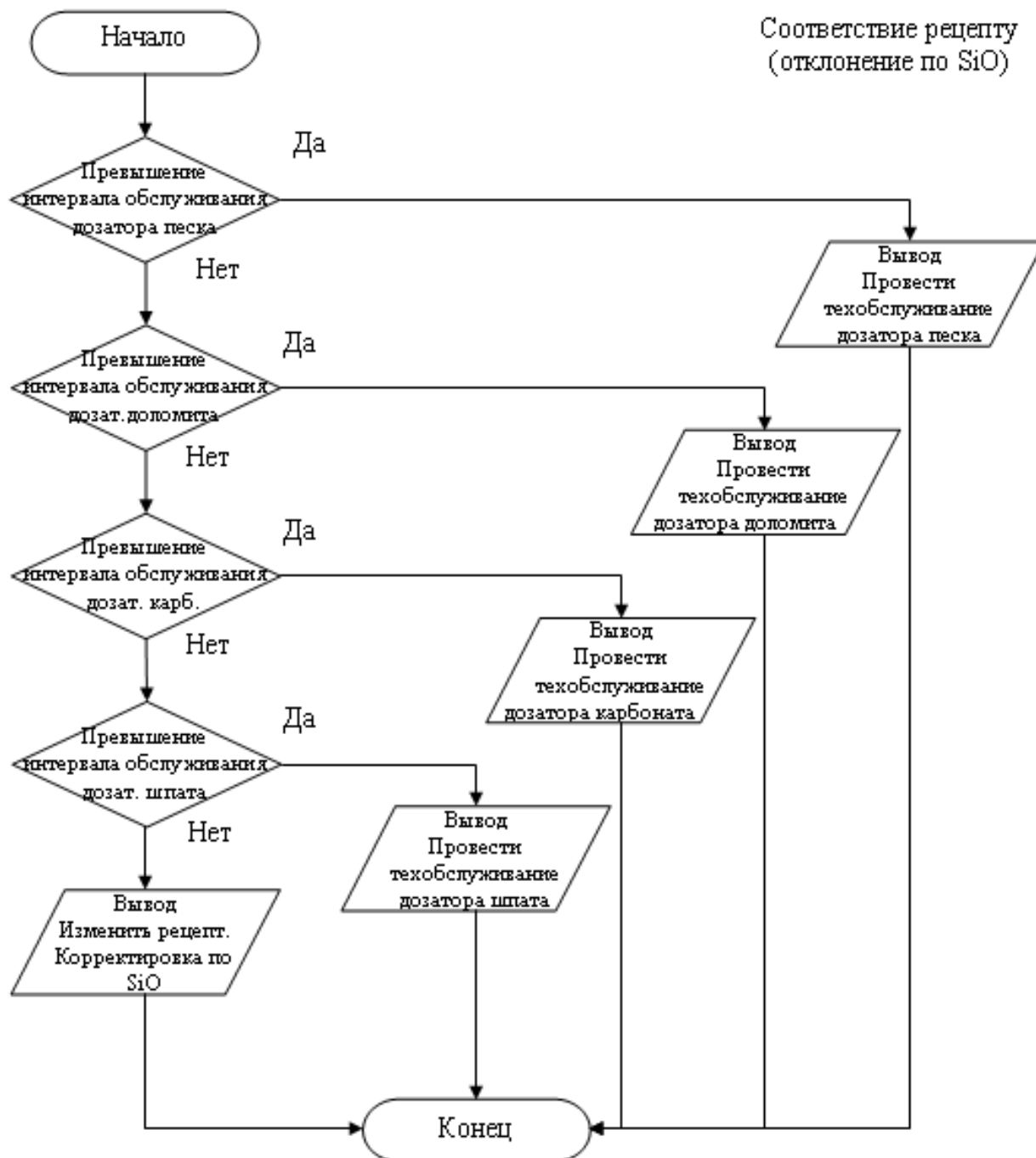


Рисунок 3.3 - Блок-схема подпрограммы «Отклонение по SiO»

Программное приложение CNQ разработано на объектно-ориентированном языке программирования C#. Для практической работы с ИНС применена кроссплатформенная библиотека численного анализа

ALGLIB [361]. Отличительными характеристиками библиотеки являются автоматическая настройка и отсутствие излишней функциональности. Эти характеристики позволяют пользователю сосредоточиться на принятии важных принципиальных решений, т.к., как показывает практика, в большинстве случаев достаточно применения нескольких типовых архитектур, которые нельзя существенно улучшить тонкой настройкой. ИНС в ALGLIB реализована в пакете DataAnalysis подпакетами mlpbase (класс multilayerperceptron) и mlptrain (классы mlpcvreport, mlpreport). Первый подпакет служит для выбора архитектуры и инициализации структуры сети (функции mlpcreate1 и mlpcreate2, с одним и двумя скрытыми слоями соответственно) и использования обученной ИНС (применение к входным данным). Второй подпакет необходим для обучения ИНС методом Левенберга–Марквардта (функция mlptrainlm) [362].

3.2. Компьютерная модель химико-технологического процесса формирования движущейся ленты стекла

Проверка и анализ работы итерационного процесса численными методами. Для проверки итерационного процесса численными методами определим следующие начальные условия задачи: $x = 0..X_m$, $X_m = 4$, $f_0 = 4$, $h_0 = 0,006$. Для параметра $R \neq 0,5$ принимаем константу $R = 0,2$, чтобы ограничить растекание до заданной толщины h_0 . Выбор постоянной C произволен, но для начала принимаем $C = 1$. Для параметров T и m , которые меняются незначительно и не оказывают влияния на устойчивость процесса итераций, принимаются вначале как константы, $T = T_0$, $m = m_0$.

Для указанных условий в среде MathCAD разработан циклический процесс вычисления параметров сначала по формулам раздела (2.6 – 2.8) с использованием формул метода трапеций для численного интегрирования по точкам [363].

Для оценки решения для итерации n в каждой точке x вычисляется константа условия неразрывности потока, или в данном случае это мощность

потока или объемная скорость v_n в виде произведения всех трех выходных переменных $v_n = \phi_n \psi_n f_n = f_0$. На рисунке 3.4 представлен порядок ввода исходных данных в систему MathCAD и основной цикл итераций.

$\Delta\omega := \Delta x \leftarrow \frac{xc}{NN}$ подготовка параметров $x0 \leftarrow 0$ $f0 \leftarrow \left(\frac{H0}{h0} \right) - 1$ for k ∈ 1..1 $d \leftarrow 0$ for j ∈ 1..NN $x_j \leftarrow x0 + \Delta x \cdot j$ $T_j \leftarrow T0 \cdot (1 - kt \cdot x_j)$ $\mu_j \leftarrow \mu0 \cdot \frac{T0}{T_j}$ $\eta_0 \leftarrow 1$ $\eta_j \leftarrow \frac{\mu_j}{\mu0}$ $m_0 \leftarrow \frac{1}{2 \cdot B \cdot \eta_0}$ $m_j \leftarrow \frac{1}{2 \cdot B \cdot \eta_j}$ $R_0 \leftarrow R0 \cdot (1 + 1/2)$ $R_j \leftarrow -R0 \cdot \left[1 + 1 \cdot \frac{2}{1 + (x_j)^2} \right]$ $f_{0,k-1} \leftarrow f0$ $f_{j,k-1} \leftarrow \frac{f0}{1 + \frac{f0}{xc} \cdot (x_j)}$ $\Phi_j \leftarrow m_j \cdot (-f_{j,k-1} - R_j)$ $\Phi_0 \leftarrow m_0 \cdot (-f_{0,k-1} - R_0)$ $F_0 \leftarrow \frac{-\Phi_0}{\left(\frac{H0}{h0} \right)}$ $F_j \leftarrow \frac{-\Phi_j}{\left[\left(\frac{H0}{h0} \right) + \Delta x \sum_{i=0}^j \Phi_i \right]}$	цикл решения и вывода $\psi_{0,k} \leftarrow 1$ $\sum_{i=0}^{j-1} (F_i \cdot \Delta x) + \frac{(F_j - F_0) \cdot \Delta x}{2}$ $\psi_{j,k} \leftarrow e^{\left[\sum_{i=0}^{j-1} \left[\frac{\left(\frac{C}{\psi_{i,k}} - \frac{1}{2} \right) \cdot F_i}{\left(R_i - \frac{1}{2} \right)} \cdot \Delta x \right] + \left[\frac{\left(\frac{C}{\psi_{j,k}} - \frac{1}{2} \right) \cdot F_j}{\left(R_j - \frac{1}{2} \right)} - \frac{\left(\frac{C}{\psi_{0,k}} - \frac{1}{2} \right) \cdot F_0}{\left(R_0 - \frac{1}{2} \right)} \right] \cdot \frac{\Delta x}{2}} \right]}$ $\varphi_{j,k} \leftarrow e^{\left[\sum_{i=0}^{j-1} \left[\frac{m_i}{\varphi_{i,k}} \cdot \left(1 - R_i - \frac{C}{\psi_{i,k}} \right) \cdot \Delta x \right] + \left[\frac{m_j}{\varphi_{j,k}} \cdot \left(1 - R_j - \frac{C}{\psi_{j,k}} \right) - \frac{m_0}{\varphi_{0,k}} \cdot \left(1 - R_0 - \frac{C}{\psi_{0,k}} \right) \right] \cdot \frac{\Delta x}{2}} \right]}$ $\varphi_{0,k} \leftarrow 1$ $f_{0,k} \leftarrow \left(\frac{H0}{h0} \right) - 1$ $f_{j,k} \leftarrow \left(\frac{H0}{h0} \right) - 1 + \left[\sum_{i=0}^{j-1} \left[\frac{m_i}{\varphi_{i,k}} \cdot \left(1 - R_i - \frac{C}{\psi_{i,k}} \right) \cdot \Delta x \right] + \left[\frac{m_j}{\varphi_{j,k}} \cdot \left(1 - R_j - \frac{C}{\psi_{j,k}} \right) - \frac{m_0}{\varphi_{0,k}} \cdot \left(1 - R_0 - \frac{C}{\psi_{0,k}} \right) \right] \cdot \frac{\Delta x}{2} \right]$ $A1_{j,0+k} \leftarrow m_j$ $A1_{j,1+k} \leftarrow F_j$ $A1_{j,2+k} \leftarrow R_j$ $A1_{j,3+k} \leftarrow \Phi_j$ $A1_{j,0} \leftarrow x_j$ $A1_{0,1+4k} \leftarrow \varphi_{0,k}$ $A1_{j+0,1+4k} \leftarrow \varphi_{j,k}$ $A1_{0,2+4k} \leftarrow \psi_{0,k}$ $A1_{j+0,2+4k} \leftarrow \psi_{j,k}$ $A1_{0,3+4k} \leftarrow f_{0,k}$ $A1_{j+0,3+4k} \leftarrow f_{j,k}$	граничные условия и параметры $xc := 4 \quad h0 := 0.006 \quad H0 := 0.024$ $\mu0 := 0.02 \quad T0 := 1000 \quad kt := 0.01$ $C := 1 \quad R0 := 0.6 \quad B := 1 \quad NN := 4000$

Рисунок 3.4 - Исходные данные и основной цикл итераций в среде MathCAD

Исходные данные взяты приближенно к реальным. На рисунках 3.5 и 3.6 получились следующие графики, где номер итераций у переменных указан обычной цифрой, а не индексом. На рисунке 3.5 видно, что кривые для f , ϕ качественно соответствуют реальному решению, и главный недостаток для данного первого приближения в очень малом относительном характере эффектов для каждого параметра [494].

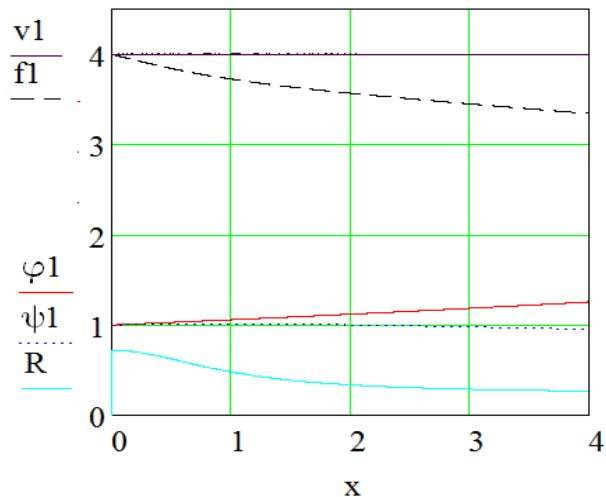


Рисунок 3.5 - Результаты вычисления Итерация №1

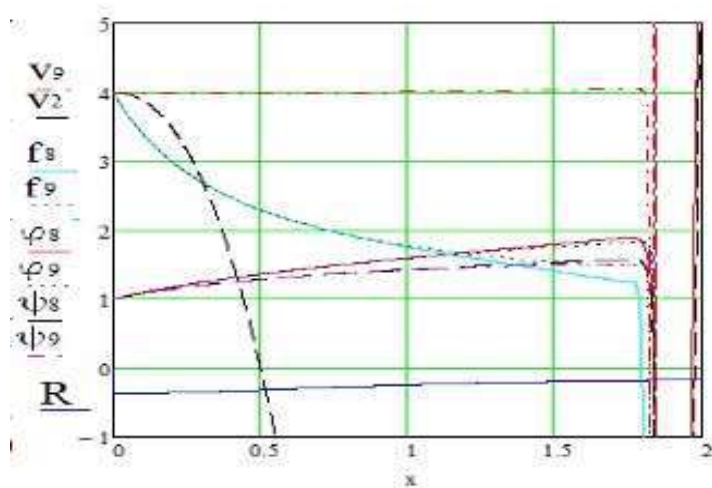


Рисунок 3.6 – Результаты вычислений Итерации №2, 8 и 9

Из рисунка 3.6 видно, что последующие итерации сходятся, но медленно, даже для этого сглаженного примера только на 8-9 номере. При этом наблюдается нарушение условия неразрывности в процессе итераций, что не гарантирует устойчивости процесса при больших величинах f . Здесь был скорректирован знак R , иначе наблюдается неограниченный рост ψ

«расплескивание». Причиной этого и грубости первого приближения по разделу 2 является пренебрежение f^2 , что верно с точки зрения квадрата, но сама величина в установившемся режиме остается достаточно большой, порядка 1, и она больше остальных слагаемых при этом.

Чтобы улучшить первое приближение, необходимо учесть это остаточное значение $f \approx 1$, отбрасывая квадратичный член. Это можно сделать, произведя линейную замену переменной $f = 1 + \xi$, где ξ – относительная высота превышения растекшегося расплава стекла над номинальной толщиной ленты h_0 .

При этом формулы 2.6 – 2.20 получают вид [357]:

$$\phi'(x) = \frac{m(x)}{1 + \xi(x)} \left(\frac{C}{\psi(x)} + \xi(x) + \frac{1}{2} \xi^2(x) \right);$$

$$\psi'(x) = \frac{m(x)\psi(x)}{(1 + \xi(x))\phi(x)} \left(R(x) + \xi(x) + \frac{1}{2} \xi^2(x) \right);$$

$$\xi'(x) = \frac{m(x)}{\phi(x)} \left(-R(x) - \frac{C}{\psi(x)} - 2\xi(x) - \xi^2(x) \right),$$

$$\phi(x_0) = 1, \quad \psi(x_0) = 1, \quad \xi(x_0) = (H_0 - h_0)/h_0,$$

$$-1 < \xi(x) < 0 \quad (x \in X_*),$$

$$\phi'(x) = \frac{m(x)}{(1 + \xi(x))} \left[\frac{C}{\psi(x)} - \frac{1}{2} \right],$$

$$\psi'(x) = \frac{m(x)\psi(x)}{(1 + \xi(x))\phi(x)} \left[R(x) - \frac{1}{2} \right],$$

$$\xi'(x) = \frac{m(x)}{\phi(x)} \left[1 - R(x) - \frac{C}{\psi(x)} \right].$$

$$[(1 + \xi(x))\phi(x)]' = m(x)[- \xi(x) - R(x)] \equiv \Phi(x),$$

$$(1 + \xi(x))\phi(x) = (1 + \xi(x_0))\phi(x_0) + \int_{x_0}^x \Phi(s) ds,$$

$$F(x) = - \frac{\Phi(x)}{(1 + \xi(x))\phi(x)},$$

$$\phi(x) = \exp \int_{x_0}^x \left[\frac{C}{\psi(s)} + \xi(s) \right] \cdot [R(s) + \xi(s)]^{-1} F(s) ds,$$

Полученные результаты моделирования приведены на рисунке 3.8.

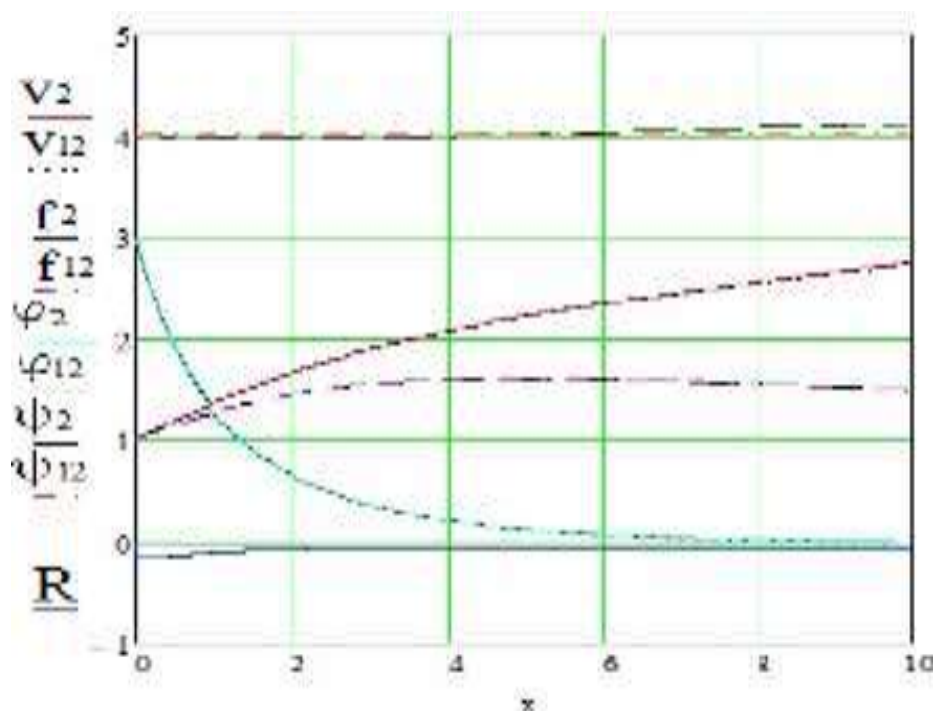


Рисунок 3.8 - Результаты моделирования

Измененные уравнения позволили расширить диапазон по x неограниченно без неустойчивости. Результат получается практически на второй итерации.

Выполнена проверка работы итерационного процесса численными методами в MathCAD [484]. По результатам анализа моделирования дополнена математическая модель и проведены повторные расчеты численными методами в MathCAD. Дополненные уравнения позволили расширить диапазон по x неограниченно без неустойчивости. После необходимой формализации всех составляющих комплексной математической модели ее планируется использовать для развития системы обучения и аттестации операторов формования листового стекла [364, 365] для визуализации динамики процессов, протекающих в ванне расплава.

3.3. Компьютерная модель позиционирования робота-манипулятора для упаковки листов стекла

Современная стекольная промышленность наращивает производство высококачественных листовых стекол марок качества М0, М1 (ГОСТ 111-2014 Стекло листовое бесцветное. Технические условия), толщиной от 3 до 19 мм и размера 3100 на 6000 мм, которые пользуются повышенным спросом, т.к. обеспечивают минимальные отходы при раскрое стекла при вторичной переработке [366]. Такие листы стекла весят от 192 до 915 кг в зависимости от толщины и при их съёме с конвейера и укладке в штабели используются автоматические роботизированные укладчики с высокой производительностью [367]. Автоматические роботизированные укладчики листов стекла относятся к тяжёлому классу промышленных манипуляционных роботов (МР) с грузоподъёмностью от 200 до 1000 кг [368 – 370].

В ГОСТ Р 60.3.3.1-2016/ИСО 9283:1998 [371] описаны методы определения и тестирования более 15 рабочих характеристик промышленных МР, из них точность и повторяемость позиционирования являются наиболее важными характеристиками [372 – 374]. Повторяемость позиционирования характеризует близость между фактическими позициями, полученными после n повторений перемещения в заданную позицию с одного и того же направления [371]. В большинстве публикаций, вышедших к настоящему времени, отражены отдельные исследования, в которых рассматриваются вероятностные модели механизмов с замкнутой кинематической цепью. Однако вероятностный анализ функционирования механизмов с разомкнутой кинематической цепью (в том числе и МР) освещён недостаточно [375, 376].

Надёжность функционирования промышленных роботов, относящихся к восстанавливаемым изделиям, характеризуют следующие основные показатели: средняя наработка на отказ, среднее время восстановления работоспособного состояния, срок службы до капитального ремонта [377].

В ГОСТ Р 60.3.3.1-2016/ИСО 9283:1998 [371] описаны методы определения и тестирования следующих рабочих характеристик

промышленных манипуляционных роботов: точность позиционирования и повторяемость позиционирования; разнонаправленное изменение точности позиционирования; точность отработки расстояния и повторяемость отработки расстояния; время стабилизации положения; перерегулирование по положению; дрейф характеристик позиционирования; взаимозаменяемость; точность отработки траектории и повторяемость отработки траектории; точность отработки траектории при переориентации; отклонения на поворотах; характеристики скорости отработки траектории; минимальное время позиционирования; статическая податливость; отклонения при поперечных перемещениях. Из всех требований точность и повторяемость позиционирования являются наиболее важными характеристиками [372, 378]. Рассмотрим один из основных показателей качества эксплуатации манипуляционного робота — надежность повторяемости позиционирования его рабочего инструмента. В большинстве публикаций, вышедших к настоящему времени, отражены отдельные исследования, в которых рассматриваются вероятностные модели механизмов с замкнутой кинематической цепью. Однако вероятностный анализ функционирования механизмов с разомкнутой кинематической цепью (в том числе и МР) освещен недостаточно.

Рассмотрим вероятностный подход к построению кинематической модели МР и анализ оценки повторяемости позиционирования МР, позволяющий сформировать статистический критерий качества работы манипулятора. В основу методики оценки надежности повторяемости позиционирования положена гипотеза о нормальном (по Гауссу) распределении случайных величин, являющихся кинематическими параметрами МР [379].

Кинематика манипуляционного робота.

Выберем кинематическую схему функционирования МР, предполагающую определение изменения его пространственной конфигурации. Данная конфигурация МР определяется зависимостями между

обобщенными координатами с одной стороны, а также положением и ориентацией рабочего органа (РО) МР – с другой, в известной функции времени [379].

Для описания вращательных и поступательных связей между соседними звеньями МР Денавит и Хартенберг [380] применили метод последовательного построения систем координат, связанных с каждым звеном кинематической цепи. Рассмотрим схему двухзвенного узла МР с тремя кинематическими парами (КП) (данная схема графически представлена в монографии [369], с.131).

По Денавиту-Хартенбергу каждому звену (кинематической паре) соответствуют четыре геометрических параметра. При этом расстояние d_i и угол θ_i между осями x_i , x_{i-1} систем осей координат, связанных с соседними звеньями, устанавливают относительное положение, а длина a_i и угол α_i между координатными осями z_i , z_{i-1} (угол поворота звена) определяют структуру звеньев.

Для вращательной КП величины α_i , a_i , d_i являются параметрами сочленения, а θ_i – обобщенной координатой. Для поступательной КП величины α_i , a_i , θ_i являются параметрами сочленения, а d_i – обобщенной координатой.

Определение конфигурации МР, т.е. нахождение положения и ориентации его звеньев по заданным параметрам механической руки и обобщенным координатам, является прямой задачей кинематики ([369], с.29). Эта задача решается путем применения известного векторно-матричного аппарата, в котором используются системы ортогональных координатных базисов, связанных с соответствующими звеньями МР [379].

Относительное положение двух смежных звеньев МР можно характеризовать, применяя однородную матрицу преобразования (матрицу преобразования по Денавиту-Хартенбергу [380]; см. также [369], с.57), имеющую следующую структуру

$$D_{i-1}^i = \begin{bmatrix} A_i & \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} B_i^* \\ I_i \end{bmatrix} & aA_i \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Здесь блочные матрицы имеют вид

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix}, \quad 0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad I_i = \begin{bmatrix} d_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad B_i^* = \frac{\partial B_i}{\partial \alpha_i},$$

$$B_i = [-\cos \alpha_i \sin \theta_i, \quad \cos \alpha_i \cos \theta_i, \quad \sin \alpha_i, \quad 0]^T.$$

Матрица D_{i-1}^i связывает координатные ортобазисы, имеющие номера i , с координатным ортобазисом номера $i - 1$. Тогда конфигурация МР определяется результирующей матрицей («матрицей манипулятора» [369], с.60)

$$T = D_0^1 D_1^2 \cdots D_{n-1}^n = \prod_{i=1}^n D_{i-1}^i. \quad (3.2)$$

где D_{i-1}^i – матрица структуры (3.1), n – число сочленений манипулятора.

Матрица T (3.2) может быть представлена в виде

$$T = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{s} & \vec{a} & \vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

где в первой строке содержатся векторы нормали к РО, касательный вектор РО (вектор ориентации), вектор подхода РО и вектор его положения, соответственно. При этом упорядоченная совокупность $(\vec{n}, \vec{s}, \vec{a})$ образует тройку векторов правой ориентации [381].

Классификация вероятностных погрешностей.

В процессе работы МР при управлении его движением заданные параметры конфигурации (положения и ориентации) звеньев преобразуются в соответствующий упорядоченный набор обобщенных координат. Это преобразование является результатом решения обратной задачи кинематики. Информация о полученном наборе координат направляется в управляющее устройство, формирующее исполнительные сигналы для приводов, находящихся в сочленениях МР. Данные приводы обеспечивают заданные перемещения звеньев, в результате чего формируется конфигурация МР.

При практической реализации данного алгоритма возникает определенное расхождение между заданной и фактически полученной

конфигурацией МР, обусловленное возникающими погрешностями (ошибками). Приведем основные возможные причины возникновения этих погрешностей.

Производственно-сборочные погрешности.

Отклонения кинематических параметров руки МР от номинальных могут быть вызваны производственными и сборочными допусками. Эти отклонения могут быть минимизированы заданием минимально возможных допусков. Практически такой подход неприемлем ввиду связанных с этим больших издержек производства. Альтернативой такому подходу является определение максимально точных значений кинематических параметров путем применения адекватных методов идентификации. Однако это, в свою очередь, потребует использования сложных измерительных устройств. Помимо этого, процедуры измерений являются трудоемкими и малоэффективными для применения в массовом производстве. Поэтому для определения параметров каждого МР, сходящего со сборочной линии, их использование неприемлемо. При этом следует отметить, что даже абсолютно точное измерение параметров МР не может идеально обеспечить его заданную конфигурацию ввиду систематически возникающих случайных ошибок в полученных значениях обобщенных координат его элементов [379].

Погрешности приводов и алгоритмов управления.

Погрешности этого вида порождаются рядом причин, среди которых существенное значение имеют следующие: наличие зазоров в зубчатых передачах, упругость зубчатых передач, систематические ошибки двигателей приводных устройств, а также накопление погрешностей, вызванных округлениями значений параметров в алгоритмах управления.

Все эти погрешности вызывают тенденцию дрейфа значений обобщенных параметров МР. Частичной компенсации этих погрешностей можно достичь установкой в кинематических парах датчиков, передающих считываемую ими информацию о фактических значениях обобщенных координат в канал обратной связи. Поскольку разрешающая способность

датчиков реально ограничена, то такого рода погрешности полностью исключить невозможно.

Погрешности, обусловленные зазорами в подшипниках.

Погрешности этого рода влияют на величины кинематических параметров МР и для различных типов КП построены соответствующие им математические модели погрешностей, возникающих при работе МР.

Все вышеупомянутые погрешности имеют вероятностную природу. Однако существуют погрешности, не носящие случайного характера. К таким погрешностям относятся, в частности, погрешности, обусловленные упругой деформацией звеньев МР. Эти погрешности относятся к существенным для малогабаритных МР, работающих с большими скоростями. Однако для большинства МР с достаточно жесткими звеньями погрешности данного рода являются малосущественными [379].

Если отклонения кинематических параметров отдельного МР от заданных (номинальных) являются пренебрежимо малыми, так что их вероятностное распределение соответствует изменениям кинематических параметров целого класса МР данного типа, то такого рода погрешности по характеру являются **глобальными**.

Как известно, каждый конкретный МР имеет индивидуальные систематические ошибки измерения обобщенных координат. Вследствие этого данные ошибки можно считать **локальными**. Распределения этих погрешностей отвечают не только дрейфу обобщенных координат данного конкретного МР, но и отклонениям, соответствующим определенному классу МР.

Классификация надежности повторяемости позиционирования манипуляционного робота.

Рассмотрим вопрос о классифицировании типов надежности повторяемости позиционирования МР в зависимости от характера выполняемых ими операций. Под надежностью воспроизводимости позиционирования МР понимается вероятность попадания значений

параметров, совокупность которых характеризует конфигурацию (положение и (или) ориентацию) МР, в диапазон требуемых значений. Назовем диапазон требуемых значений данных параметров **областью допустимых значений** (ОДЗ). Размеры и конфигурация ОДЗ определяется назначением МР и особенностями его конструкции [379].

Анализ широкого класса ОДЗ позволяет выделить следующие основные типы надежности повторяемости позиционирования МР.

Надежность по положению (Position).

Этот тип надежности можно подразделить на следующие подтипы.

Надежность типа P-1 (Position-1). Предполагается, что РО МР - схват расположен в плоскости, параллельной рабочей плоскости. В этом классе надежности на положение схвата в плоскости его расположения налагаются более жесткие допуски, чем на его расстояние от рабочей плоскости.

Рассмотрим конкретный случай, при котором МР выполняет операцию по наведению и заворачиванию винта в отверстие с резьбой. Примем, что рабочая плоскость расположена ортогонально оси отверстия, а ось винта параллельна оси отверстия. Тогда ось винта должна быть расположена максимально близко к оси отверстия. При выполнении этих условий до контакта винта с окрестностью резьбового отверстия расстояние от винта до отверстия не играет существенной роли. В этом случае допуски можно определить как максимальное удаление $\Delta\ell$ оси отверстия от оси винта. Тогда ОДЗ будет являться прямым круговым цилиндром радиуса $\Delta\ell$, соосным с резьбовым отверстием. Надежность, соответствующая ОДЗ данного вида, определяется как надежность типа P-1.

Определим выражение для величины смещения оси винта относительно оси резьбового отверстия $(\Delta\ell)_a$. Пусть в заданном координатном ортобазисе точка пересечения резьбового отверстия с рабочей плоскостью определяется координатами (x_0, y_0, z_0) , а фактическое положение схвата МР – координатами (x_r, y_r, z_r) . Зададим рабочую плоскость уравнением [2.4.003]

$$A_1(x - x_0) + A_2(y - y_0) + A_3(z - z_0) = 0, \quad (3.4)$$

где A_1, A_2, A_3 – координаты направляющего вектора оси резьбового отверстия, (x, y, z) – координаты текущей (произвольной) точки этой плоскости. Тогда

$$(\Delta\ell)_a = \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_i \delta}{|A|} - x_{0i} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3.5)$$

В формуле (5) обозначено:

$$\delta = D - (A_1 x_r + A_2 y_r + A_3 z_r), \quad D = A_1 x_0 + A_2 y_0 + A_3 z_0, \\ |A| = (\sum_{i=1}^3 A_i^2)^{1/2}, \quad (x_{01}, x_{02}, x_{03}) = (x_0, y_0, z_0). \quad (3.6)$$

Таким образом, надежность типа Р-1 определяет вероятность реализации значения $(\Delta\ell)_a < \Delta\ell$, где величина $(\Delta\ell)_a$ определяется равенством (3.5) [379].

Надежность типа Р-2 (Position-2). Этот класс надежности предусматривает наложение более жестких требований к допускам на расстояние РО до рабочей плоскости, чем требования к допускам, налагаемым на положение РО в плоскости, параллельной рабочей плоскости. Типовым примером такого рода операций является процесс металлонапыления поверхностей деталей, когда наконечник (сопло) распылителя должен располагаться на заданном расстоянии от напыляемой поверхности. При этом положение самого распылителя на плоскости, параллельной рабочей плоскости, имеет второстепенное значение.

Пусть $\langle d \rangle$ - номинальное или среднее значение расстояния от РО до рабочей плоскости, а Δd - величина заданного допуска на данный параметр. Тогда расстояние от РО до рабочей плоскости определяется как $\langle d \rangle \pm \Delta d$ и ОДЗ в этом случае является полосой, параллельной рабочей плоскости, шириной $2\Delta d$, срединная плоскость которой отстоит на расстоянии $\langle d \rangle$ от рабочей плоскости. Надежность, соответствующая ОДЗ данного вида, классифицируется как надежность типа Р-2.

Обозначим (x_d, y_d, z_d) координаты точки в заданном координатном ортобазисе, совпадающей с требуемым положением РО, находящимся на

расстоянии $\langle d \rangle$ от фиксированной плоскости, определяемой уравнением (3.4). Тогда [381]

$$\langle d \rangle = |A|^{-1}[D - (A_1x_d + A_2y_d + A_3z_d)].$$

Фактическое расстояние от РО до рабочей плоскости определяется равенством

$$d_r = |A|^{-1}[D - (A_1x_r + A_2y_r + A_3z_r)], \quad (3.7)$$

где координаты (x_r, y_r, z_r) определяют фактическое положение РО, а параметры $|A|$, D находятся по формулам (3.6).

Обозначив через $(\pm \Delta d)$ заданный допуск на значение параметра $\langle d \rangle$, заключаем, что надежность типа Р-2 определяет вероятность реализации величины d_r , вычисляемой по формуле (3.7), в интервале значений $(\langle d \rangle - \Delta d, \langle d \rangle + \Delta d)$.

Надежность типа Р-3 (Position-3). Классификация надежности типов Р-1 и Р-2 не предусматривает наложения ограничений на положение РО ни в заданной плоскости, ни вдоль заданной линии. Однако существуют конвейерно-сборочные операции, при выполнении которых требуется полностью ограничить положение РО. К такого рода операциям относятся, в частности, манипуляции, выполняемые при сборке микросхем и при точечной сварке на рабочей плоскости. В качестве допусков при этом можно задавать максимальные отклонения координат (x, y, z) положения РО от их средних значений $(\pm \Delta x, \pm \Delta y, \pm \Delta z)$, а в качестве ОДЗ принять область в виде прямоугольного параллелепипеда с длинами ребер $2(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, центр которого совпадает с требуемым положением РО. Надежность, соответствующая ОДЗ данного вида, определяется как надежность типа Р-3.

Надежность данного типа при заданной ОДЗ понимается как вероятность реализации параметров (x_r, y_r, z_r) , значения которых реализуются внутренними точками ОДЗ:

$$x_d - \Delta x < x_r < x_d + \Delta x,$$

$$y_d - \Delta y < y_r < y_d + \Delta y,$$

$$z_d - \Delta z < z_r < z_d + \Delta z.$$

Таким образом, из трех рассмотренных типов надежности надежность типа Р-3 обеспечивает наибольший запас, так как при одних и тех же условиях она имеет наименьшее значение [379].

Надежность по ориентации (Orientation)

Этого рода надежность определяется только по отношению к погрешностям ориентирования РО. Ориентация РО МР полностью определяется векторным ориентационным базисом $R = (\vec{n}, \vec{s}, \vec{a})$, входящим в подматрицу матрицы $T(3)$ преобразования координат РО в уравнении (3.2).

Данный тип надежности можно подразделить на следующие подтипы в зависимости от способа задания ограничений на ориентацию.

Надежность типа О-1 (Orientation-1). При выполнении МР некоторых операций (например, при сверлении отверстий) для обеспечения выполнения цели достаточно задать только один из ортов ориентационного базиса R . Тогда для определения ОДЗ достаточно задать минимально и максимально допустимые значения направляющих косинусов выбранного из R вектора относительно основного координатного базиса.

В случае, когда фактические значения направляющих косинусов находятся в заданных пределах, ориентация РО приемлема для достижения поставленной цели операции.

Таким образом, надежность типа О-1 определяет вероятность реализации фактических значений направляющих косинусов в указанных допустимых пределах [379].

Надежность типа О-2 (Orientation-2). Для выполнения ряда высокоточных сборочных операций требуется задать полную ориентацию РО в основном координатном базисе. Это приводит к необходимости задать все три вектор-параметра базиса R , например, углы Эйлера φ, θ, ψ .

Соотношения связи между углами Эйлера и координатами ортов базиса R могут быть получены методом обратных преобразований, связанных с базовой матрицей ортобазиса R

$$\begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix},$$

при решении обратной задачи кинематики в эйлеровых координатах. Решение этой задачи неоднозначно и, в зависимости от применяемого способа, приводит к следующим группам ([369], с.73,74).

Первая группа

$$\begin{aligned} \phi &= ATAN2(a_x, -a_y), \\ \theta &= ATAN2(a_x \sin \phi - a_y \cos \phi, a_z), \\ \psi &= ATAN2(-s_x \cos \phi - s_y \sin \phi, n_x \cos \phi + n_y \sin \phi). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Вторая группа

$$\begin{aligned} \phi &= ATAN2(n_y \cos \psi - s_y \sin \psi, n_x \cos \psi - s_x \sin \psi), \\ \theta &= ATAN2(n_z \sin \psi + s_z \cos \psi, a_z), \\ \psi &= ATAN2(n_z, s_z). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Здесь $ATAN$ – специальная обратная тригонометрическая функция [369], однозначно определяющая значения углов Эйлера, полученных в результате обратного преобразования.

Соотношения (3.8), (3.9) обеспечивают устойчивый вычислительный алгоритм и впервые получены в работе [382].

Если задать максимально допустимые отклонения значений углов Эйлера от их средних значений, то вероятность попадания фактических значений этих углов в ОДЗ определит надежность типа О-2 [379].

Полная надежность повторяемости позиционирования

Для большинства случаев промышленного применения МР при определении суммарной (полной) надежности повторяемости позиционирования требуется определить надежность как по положению, так и по ориентации в комплексе. В частности, при выполнении МР с шестью степенями свободы операции по съему листового стекла с конвейера и укладе в штабель для определения полной надежности повторяемости позиционирования следует комбинировать надежности типов Р-1 и О-1. Это

обуславливает вероятность одновременного попадания параметров положения и ориентации РО в пределы их соответствующих ОДЗ так, как это было установлено при классифицировании надежностей типов Р-1 и О-1.

Методика организации вычислительных экспериментов проверки адекватности математических моделей ХТП многостадийного производства листового стекла.

Рассмотрим методику организации вычислительных экспериментов проверки адекватности компьютерных моделей ХТП многостадийного производства листового стекла на примере определения надежности повторяемости позиционирования МР, которую можно рассчитать путем применения либо аналитического, либо численного метода, в частности, метода численного моделирования [379]. Приведем описание применения каждого из этих методов.

Применение аналитического метода.

Применение этого метода предполагает предварительное построение аналитической вероятностной модели кинематики МР. В основу данной модели положена центральная предельная теорема теории вероятностей ([383], с.454; [384], с. 506). В силу этого примем, что параметры, определяющие положение и ориентацию РО, соответствуют закону нормального совместного распределения вне зависимости от распределений кинематических параметров и обобщенных координат.

Алгоритм применения данного метода сводится к следующему. Определяются вероятностные параметры: математические ожидания, дисперсии σ^2 , ковариации σ параметров конфигурации РО. Для этого применяются кинематические уравнения МР, связывающие его кинематические параметры и обобщенные координаты с параметрами конфигурации. На основе найденных величин строится описание функции нормального совместного распределения.

Математические ожидания параметров конфигурации РО МР определяются на основе математических ожиданий случайных величин

кинематических параметров и обобщенных координат. Величины дисперсий и ковариаций параметров определяются с применением правила частных производных [379].

Найденные величины математических ожиданий, дисперсий и ковариаций позволяют определить функцию плотности вероятностей двумерного нормального совместного распределения. Это дает возможность найти надежность повторяемости позиционирования МР путем интегрирования по ОДЗ найденной функции плотности вероятностей нормального совместного распределения.

При использовании данного алгоритма в рамках аналитического метода следует учитывать некоторые особенности, сводящиеся к следующему. Применение правила частных производных приводит дополнительные погрешности; они обусловлены усечением разложений соответствующих функций в ряды Тейлора в окрестности математических ожиданий. Кроме того, дополнительные погрешности вносятся и в результате выполнения двойного интегрирования по ОДЗ функции плотности вероятностей. Эти факторы снижают точность ожидаемого результата вычислений.

Применение метода статистических испытаний.

В целях оценки достоверности результатов расчета надежности МР, полученных аналитическим методом, применяется альтернативный ему метод – метод статистических испытаний. Алгоритм применения этого метода состоит в следующем [379].

(1) Первоначально устанавливается множество случайных величин, к которым относятся кинематические параметры МР и его обобщенные координаты.

(2) Затем принимаются законы распределения вероятностей случайных величин. В дальнейшем для всех случайных величин принимается нормальное (гауссово) распределение вероятностей, одномерная предельная форма которого представляется плотностью распределения вида [385]

$$\phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right] \quad (-\infty < x < +\infty), \quad (3.10)$$

где a , σ - математическое ожидание и стандартное отклонение независимых одинаково распределенных случайных величин, соответственно.

(3) Следующим шагом на основе принятого закона распределения вероятностей находятся значения вероятности каждой случайной величины, в результате чего определяется совокупность случайных величин, позволяющая установить конфигурацию области возможных значений (ОВЗ) параметров РО.

(4) Определяется конфигурация ОВЗ параметров РО.

(5) Определяется исход каждого отдельного статистического испытания путем проверки принадлежности значений параметров конфигурации ОВЗ РО соответствующей ОДЗ.

Повторяя последовательно все предыдущие шаги данного алгоритма, следует провести достаточно много таких испытаний. В результате надежность W определяется равенством

$$W = \frac{n_*}{n}, \quad (3.11)$$

где n_* , n - количество успешных испытаний и количество всех проведенных испытаний.

Получением соотношения (3.11) завершается одношаговая процедура цифрового моделирования. В целях повышения достоверности результата количество таких шагов должно быть достаточно большим.

Конфигурация МР определяется зависимостями между обобщенными координатами, с одной стороны, а также положением и ориентацией рабочего органа (РО) МР – с другой, в известной функции времени. Рассмотрим схему двухзвенного узла МР с тремя кинематическими парами. Применяя алгоритм [379], реализующий аналитический метод, найдем оценку повторяемости позиционирования двухзвенного плоского МР, схема которого представлена в полярных координатах r , θ на рисунке.3.9. Конфигурационные параметры МР $\ell_1, \ell_2, \theta_1, \theta_2$ изначально предполагаются независимыми случайными величинами, распределёнными по закону Гаусса (3.10), где a , σ -

математическое ожидание и стандартное отклонение независимых одинаково распределённых случайных величин, соответственно.

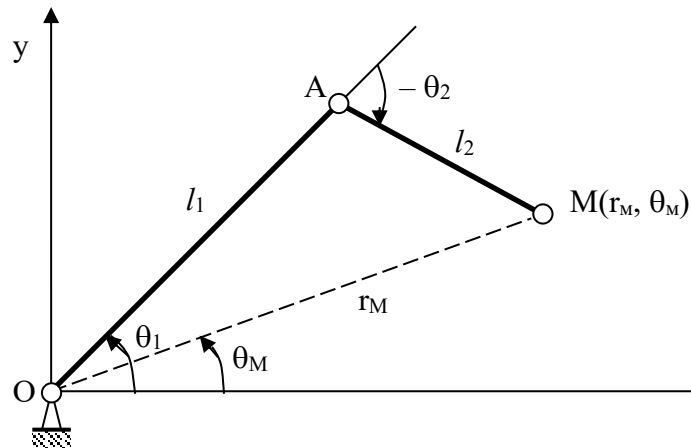


Рисунок 3.9 - Схема двухзвенного плоского манипулятора

Положим: $\ell_1 = 2,6$ м, $\ell_2 = 0,6$ м, $\sigma(\ell_1) = \sigma(\ell_2) = 10^{-4}$ м, $\sigma(\theta_1) = \sigma(-\theta_2) = 1,745 \cdot 10^{-3}$ рад, где σ - символ стандартного отклонения заданных величин от их номинальных значений [503]. Тогда оценка повторяемости позиционирования манипуляционного робота W определяется как вероятность $P(r, \theta)$ попадания параметров его конфигурации в области допустимых значений (ОДЗ) – кольцевой сегмент с размерами $(2\Delta r, 2\Delta\theta)$ рисунок 3.10:

$$W = P[\bar{r} - \Delta r \leq r \leq \bar{r} + \Delta r, \quad \bar{\theta} - \Delta\theta \leq \theta \leq \bar{\theta} + \Delta\theta], \quad (3.12)$$

где $(\Delta r, \Delta\theta) > 0$.

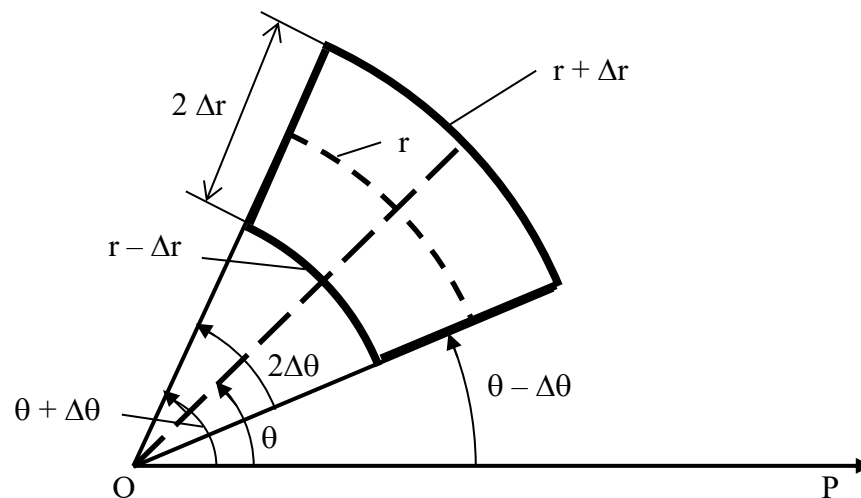


Рисунок 3.10 - Область допустимых значений параметров манипуляционного робота на координатной плоскости

В формуле (3.12) и всюду в дальнейшем черта сверху – символ математического ожидания данной величины. В численных расчетах, приведенных ниже, принято: $\Delta r = 3 \cdot 10^{-4} \text{м}$, $\Delta \theta = 2,91 \cdot 10^{-3} \text{рад}$.

Применим алгоритм расчёта оценки повторяемости позиционирования МР на основе аналитического метода. Координаты положения рабочего органа (РО) $M(r_M, \theta_M)$ определяются равенствами

$$r_M = (\ell_1^2 + \ell_2^2 + 2\ell_1\ell_2 \cos \theta_2)^{\frac{1}{2}}, \quad \sin|\theta_1 - \theta_M| = \frac{\ell_2}{r_M} \sin|\theta_2|, \quad (3.13)$$

следующими из схемы (рисунок 3.9).

Вычислим двумерную функцию плотности вероятностей нормального совместного распределения $p(r, \theta)$ величин r_M, θ_M . Для этого следует вычислить математическое ожидание $M(r_M, \theta_M) = (\bar{r}_M, \bar{\theta}_M)$ и дисперсии $\sigma_r^2, \sigma_\theta^2$, применяя, в силу (3.13), соотношения

$$\begin{aligned} \bar{r}_M &= (\bar{\ell}_1^2 + \bar{\ell}_2^2 - 2\bar{\ell}_1\bar{\ell}_2 \cos \bar{\theta}_2)^{\frac{1}{2}}, \quad \sin|\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_M| = \frac{\bar{\ell}_2}{\bar{r}_M} \sin|\bar{\theta}_2|, \\ \sigma_r^2 &= \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial r_M}{\partial p_i} \right)_k^2 \sigma_{p_i}^2, \quad \sigma_\theta^2 = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial \theta_M}{\partial p_i} \right)_k^2 \sigma_{p_i}^2, \quad \sigma_{r\theta} = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial r_M}{\partial p_i} \right)_k \left(\frac{\partial \theta_M}{\partial p_i} \right)_k. \end{aligned} \quad (3.14)$$

В равенствах (3.14) следует принять: $p_1 = l_1, p_2 = l_2, p_3 = \theta_1, p_4 = \theta_2$, а нижний индекс «к» относится к значениям частных производных, вычисленных в точках области, соответствующих математическим ожиданиям.

Двумерная функция плотности вероятностей нормального совместного распределения величин r_M, θ_M , согласно равенствам (3.14) определяется соотношением ([384], с.520)

$$\phi(r_M, \theta_M) = \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_\theta\sqrt{1-\rho^2}} \Phi(\rho, r_M, \theta_M), \quad (3.15)$$

где $\Phi(\rho, r_M, \theta_M) = \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} (u_r^2 - 2\rho u_r u_\theta + u_\theta^2) \right]$. В равенстве (3.15)

обозначено $u_r = \frac{r_M - \bar{r}_M}{\sigma_r}, \quad u_\theta = \frac{\theta_M - \bar{\theta}_M}{\sigma_\theta}, \quad \rho = \frac{\sigma_{r\theta}}{\sigma_r\sigma_\theta}$.

Оценка повторяемости позиционирования МР определяется соотношением

$$W = \int_{-w_\theta}^{w_\theta} d\theta_M \int_{-w_r}^{w_r} \phi(r_M, \theta_M) dr_M, \quad (3.16)$$

где $w_r = \Delta r / \sigma_r$, $w_\theta = \Delta \theta / \sigma_\theta$.

При расчете величины W (3.16) дополнительно учитывается условие $\bar{r}_M \leq \bar{\ell}_1 + \bar{\ell}_2$. При невыполнении этого условия значению функции $\phi(r_M, \theta_M)$ присваивается нуль. Это позволяет провести расчёт, исключив нереализуемое событие $\bar{r}_M > \bar{\ell}_1 + \bar{\ell}_2$, которое возможно для первого набора исходных данных $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$.

Для функционирования двухзвенного плоского МР, обеспечивающего съём с конвейера листов стекла размером 3100 на 6000 мм и установку их в пачку листов стекла, особое значение имеют положения МР [503]:

1. Снятие вакуумным захватом листа стекла с конвейера (рисунок 3.11), которое определяется значениями $\theta_1 = 158,57^\circ, \theta_2 = 292,63^\circ$.
2. Установка вакуумным захватом листа стекла в упаковку листов стекла (рисунок 3.11), которое определяется значениями $\theta_1 = 49,56^\circ, \theta_2 = 116,51^\circ$.

На рисунке 3.11 показана схема манипуляционного робота для съёма листов стекла компании Grenzenbach.

Численный расчёт значения оценки повторяемости позиционирования двухзвенного плоского МР для принятых выше конфигурационных параметров проведён с помощью системы Mathcad 14. Результаты вычислений представлены в следующей таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Оценка повторяемости позиционирования двухзвенного плоского МР

№	$\bar{\theta}_1, ^\circ$ (рад)	$\bar{\theta}_2, ^\circ$ (рад)	$\bar{r}_M, \text{м}$	$\bar{\theta}_M$, рад		Оценка W	
				$(\theta_1 - \theta_M) > 0$	$(\theta_1 - \theta_M) < 0$	$(\theta_1 - \theta_M) > 0$	$(\theta_1 - \theta_M) < 0$
1	158,57 (2,76756)	292,63 (5,10735)	2,885	2,574	2,961	0,2412604	0,241526
2	49,56 (0,86499)	116,51 (2,03348)	2,393	1,091	0,639	0,2086434	0,208639

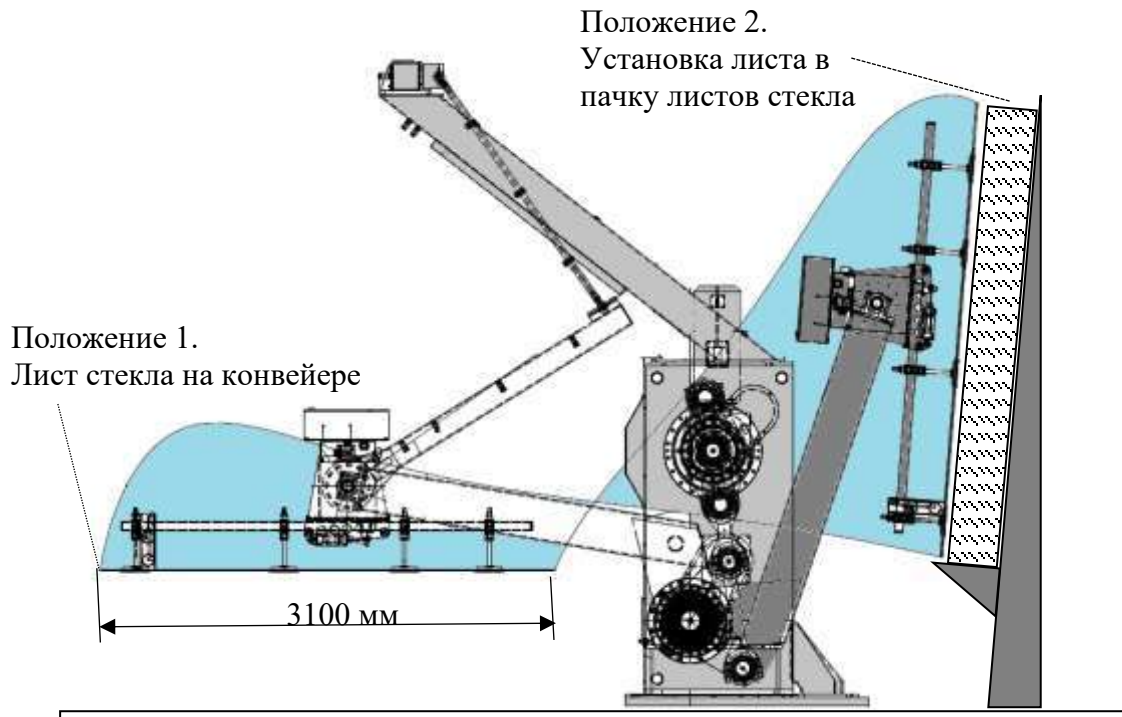


Рисунок 3.11 - Схема манипуляционного робота для съёма листов стекла [503]

Применение аналитического метода неизбежно связано с последовательным накоплением погрешностей в процессе вычислений. При этом суммарная погрешность пропорциональна количеству выполненных вычислительных операций. Помимо этого, при использовании данного метода на точность вычисления влияют факторы, отмеченные выше (применение правила частных производных при вычислении вариаций, а также приближенное вычисление интеграла (3.16)).

Оценка повторяемости позиционирования МР, согласно равенству (3.16), измеряется вероятностью, полученной путём интегрирования функции плотности вероятностей, которая, в свою очередь, есть функция математических ожиданий совокупности параметров конфигурации МР. Следовательно, различным конфигурациям РО в его конфигурационном пространстве соответствуют определённые (вообще говоря, различные) оценки повторяемости позиционирования МР. Вследствие этого, если расположение РО не задано, то получить единственное значение оценки повторяемости позиционирования МР принципиально невозможно.

Как правило, МР промышленного применения выполняют ряд повторяющихся программно заданных операций. Это позволяет выделить в рабочем пространстве позиционные точки, в которых МР выполняет конкретную операцию или программно заданную последовательность операций. Тогда имеется возможность определить повторяемость позиционирования МР для заданных позиционных точек. В тех случаях, когда при выполнении данной задачи МР может принимать несколько конфигураций, представляется возможность выбрать из этого множества конфигурацию, обеспечивающую более высокую оценку повторяемости позиционирования МР [379].

Способность МР достичь заданной конфигурации в конфигурационном пространстве характеризуется его точностью, определяемой расстоянием между заданным и фактическим положением РО. В свою очередь, показателем точности может являться повторяемость МР, т.е. его способность повторить своё движение с заданной точностью. Повторяемость определяется расстоянием в конфигурационном пространстве между конечными положениями РО при многократном выполнении одной и той же операции. Для выполнения МР работы высокого качества показатели точности и повторяемости являются определяющими.

Результаты расчёта повторяемости позиционирования МР можно применить для оценки как точности, так и повторяемости МР. Точность определяется погрешностями его кинематических параметров и обобщённых координат. Тогда оценка повторяемости позиционирования МР, вычисленная как функция математических ожиданий совокупности кинематических параметров и обобщённых координат, является достоверным критерием точности МР. Повторяемость позиционирования МР определяется только погрешностями обобщённых координат [379].

Дальнейшее развитие результатов, полученных в настоящей работе, может быть сведено к созданию алгоритмов синтеза, на основе которых может быть осуществлен расчёт технологических допусков и параметров привода,

обеспечивающих необходимую повторяемость позиционирования манипуляционного робота для съёма листов стекла.

3.4. Выводы

Раздел 3.1. Применение нейросетевой модели соответствия шихты рецепту и данных технологических параметров из ЕИАС позволяет осуществлять непрерывный автоматический контроль качества шихты и вырабатывать управляющие воздействия, обеспечивающие соответствие режимов ТП показателям технологического регламента производства. Полученная структура ИНС соответствия шихты рецепту позволила построить функции (2.1 – 2.4) со среднеквадратичной ошибкой не более 0,001 [343]. Для предприятий, выпускающих листовое стекло, данная ошибка допустима, и полученные модели использовались для исследования влияния изменения свойств сырьевых материалов на качество шихты, а также для прогнозирования и управления качеством шихты. Улучшение стабильности показателей качества шихты обеспечивает повышение эффективности технологического процесса производства стекольной шихты в целом: увеличится процент выпуска шихты первой категории, уменьшатся средние и среднеквадратические отклонения по составу.

Раздел 3.2. Выполнена проверка работы итерационного процесса численными методами в MathCAD. По результатам анализа моделирования дополнена математическая модель и проведены повторные расчеты численными методами в MathCAD. Дополненные уравнения позволили расширить диапазон по x неограниченно без неустойчивости. Проверена адекватность математической модели. Данная модель может быть использована для цифрового двойника технологического процесса формования листового стекла. После необходимой формализации всех составляющих комплексной математической модели может быть использована для проведения экспериментов с цифровым двойником

технологического процесса формования листового стекла методом флоат–процесса и развития цифрового тренажера для обучения и аттестации операторов формования листового стекла для визуализации динамики процессов, протекающих в ванне расплава.

Раздел 3.3. Определены основные источники возникновения погрешностей, связанных с использованием кинематических параметров манипуляционных роботов. При формировании кинематической модели МР применен вероятностный подход, обусловленный случайным характером данных погрешностей.

Представлена классификация основных типов надежности повторяемости позиционирования МР промышленного применения. Для расчета надежности повторяемости позиционирования двухзвенного манипулятора применены два вычислительных метода: аналитический и метод цифрового моделирования (метод статистических испытаний). Сравнение показателей надежности, вычисленных каждым из данных методов при одинаковых предпосылках, дает возможность оценить достоверность полученных результатов.

Целью применения метода статистических испытаний являлось построение грубой структурной модели, не содержащей детального описания, но достаточно устойчивой по отношению к совокупности неизвестных исходных данных.

Известно, что применение вероятностных моделей обуславливает включение в них размытых понятий и величин [386], образующих, в свою очередь, дедуктивные логические модели размытых понятий [387]. С повышением степени размытости неизбежно уменьшается значение подробных элементов исходных характеристик данной задачи, а это подкрепляет устойчивость методов ее исследования. Последнее обстоятельство для большинства исследовательских задач имеет решающее значение.

Показатели надежности можно применить для оценки как точности, так и повторяемости МР. Точность определяется погрешностями его кинематических параметров и обобщенных координат. Тогда надежность, вычисленная как функция математических ожиданий совокупности кинематических параметров и обобщенных координат, является достоверным критерием точности МР.

Повторяемость позиционирования МР определяется только погрешностями обобщенных координат. Считая все кинематические параметры детерминированными и учитывая только математические ожидания обобщенных координат, вычисленную на их основе надежность можно принять за достоверную оценку повторяемости МР. Это обеспечивается путем применения, приведенного выше алгоритма, в котором стандартные отклонения всех кинематических параметров предварительно положены равными нулю.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

4.1. Системный анализ и классификация видов дефектов листового стекла

Бесцветное прозрачное натрий-кальций-силикатное листового стекла, изготавливаемое флоат-способом, является основой для изготовления светопрозрачных строительных конструкций, деталей транспортных средств и элементов мебели. Рост производства в этих областях предъявляет новые требования к повышению производительности стекольных заводов и качеству листового стекла. В соответствии требованиями стандарта ГОСТ 111-2001 листовое стекло подразделяют на марки М0-М7 в зависимости от уровня оптических искажений и общего количества дефектов на квадратный метр листа стекла.

Дефекты на стекле подразделяются на две категории:

1. Оптические дефекты: оптические искажения, видимые в проходящем свете и оптические искажения, видимые в отражённом свете.
2. Точечные дефекты: дефекты, вызванные нерастворимыми остатками и газами. К точечным дефектам относятся: пузырь, мошка, свиль, кристаллические включения (дивитрит, волластонит, и др.), грязь (посторонний предмет на ленте стекла).

Оптические искажения и дефекты возникают из-за случайных изменений качества сырьевых материалов и нарушения технологических режимов многостадийного производства листового стекла [336, 337]. Для производства листового стекла используются сырьевые материалы: кварцевый песок, сода, доломит, карбонат кальция, полевой шпат, уголь.

Качество листового стекла определяется по окончании ТП отжига. На многих предприятиях идентификация дефектов в ленте стекла выполняется операторами, поэтому резка ленты возможна только на листы фиксированного размера. В таблице 4.1 приведен перечень точечных дефектов листового стекла.

Таблица 4.1 - Точечные дефекты листового стекла

Тип дефекта	Описание
Воздушный пузырь	Пузырь неправильной формы, образующийся обычно при операциях прессования или отливки в форму при производстве оптического стекла
Сульфатный пузырь	Включения сульфата натрия в стекле
Узел	Локализованное стекловидное включение в стекле
Отпечаток вала	Отметка, оставшаяся на поверхности прокатного стекла в том месте, где лента временно прилипла к формующим валам
Камень	Кристаллическое включение в стекле
Трещина	Глубокая трещина, полностью пронизывающая кусок стекла

Применение автоматической системы идентификации дефектов позволяет в реальном времени передавать координаты дефектов в систему резки ленты стекла и решать задачу оптимизации его раскроя. Использование таких автоматических систем обеспечивает увеличения объема выпуска высококачественного стекла марки М0. В связи с этим для повышения качества и увеличения объема выпуска листового стекла марки М0 необходима автоматическая диагностика причин возникновения точечных дефектов [335].

Для управления качеством производства существуют средства автоматического контроля. Один из способов контроля – это оптический контроль стекла на наличие дефектов. Система оптического контроля идентифицирует тип дефекта по видеоизображению участка стекла с дефектом на поверхности и вырабатывает управляющие воздействия на систему управления технологическим процессом. В мире системы автоматического контроля стекла разрабатывают зарубежные фирмы ISRA Vision, Cognix, Soft Solution. В России аналогов не производится. Поэтому задача создания отечественных систем идентификации дефектов и контроля качества листового стекла является актуальной.

4.2. Вейвлетно-нейросетевой алгоритм диагностики расположения точечных дефектов листового стекла

Качество листового стекла определяется по окончании ТП отжига. На многих предприятиях идентификация дефектов в ленте стекла выполняется операторами, поэтому резка ленты возможна только на листы фиксированного размера. Применение автоматической системы идентификации дефектов позволяет в реальном времени (РВ) передавать координаты дефектов в систему резки ленты стекла и решать задачу оптимизации его раскроя. Использование таких автоматических систем обеспечивает увеличения объема выпуска высококачественного стекла марки М0. Для повышения качества и увеличения объема выпуска листового стекла марки М0 разработана процедура автоматической диагностики причин возникновения точечных дефектов в нем.

Для автоматической диагностики причин возникновения точечных дефектов листового стекла разработана оптико-техническая система [390]. Она устанавливается перпендикулярно направлению движения стекла по конвейеру. Оборудование системы размещено в светозащищенном от внешнего освещения корпусе. Оно состоит из группы линейных видеокамер, установленных над лентой стекла, и блока структурированной подсветки, расположенного под ней. Линейные видеокамеры DALSA Piranha2 4K с промышленной оптической системой располагаются последовательно по ширине ленты стекла.

Вокруг точечного включения в листовом стекле возникают сильные оптические искажения, вызванные изменением внутренней структуры и рельефа стекла (изменение плотности, состава и др.). Для выявления оптических искажений от точечных дефектов используется структурированная подсветка ленты стекла, которая формируется наложением маски в виде чередующихся черно-белых полос на источник равномерного освещения. Линейные видеокамеры сканируют ленту стекла. Компьютерный анализ изображений с каждой линейной видеокамеры на основе методики автоматической идентификации точечных дефектов листового стекла позволяет выявлять

оптические искажения и определять положение и форму контура дефекта, а по ним идентифицировать тип дефекта.

Оптико-вейвлетный алгоритм позволяет преобразовать оптическое изображение дефекта, полученное с помощью автоматизированной системы, в электрический сигнал в виде вейвлет-изображения. Каждое вейвлет-изображение преобразуется в две бинарные точки, которые в совокупности образуют бинарный контур дефекта. На рисунке 4.1 показаны оптические изображения и электрические сигналы, полученные с использованием автоматизированной системы и обработанные в соответствии с оптико-вейвлетным алгоритмом локализации дефекта.

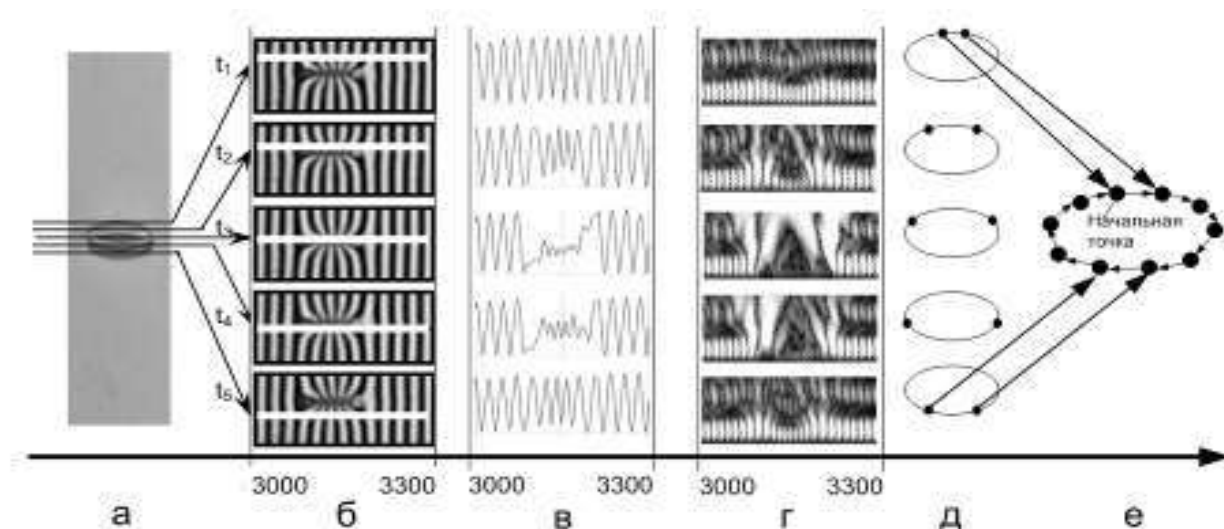


Рисунок 4.1 - Оптические изображения и электрические сигналы оптико-вейвлетного алгоритма локализации дефекта в стекле в моменты времени t_1-t_5 . На рисунке 4.1 обозначено: а) оптическое изображение дефекта «пузырь», б) оптическое изображение искаженной дефектом структурированной подсветки; в) электрический сигнал с видеокамеры; г) вейвлет-преобразование электрического сигнала; д) выделенные точки контура дефекта, е) контур дефекта, закодированный в векторной форме.

Оптическое изображение дефекта стекла «пузырь» приведено на рисунке 4.1 а. Этот дефект сканируется линейной видеокамерой в дискретные моменты времени t_i , $i = \overline{1,5}$. На рисунке 4.1 б показано оптическое изображение искаженной дефектом структурированной подсветки в моменты

времени t_i . Белая горизонтальная полоса показывает место сканирования дефекта.

Результаты сканирования линейной видеокамерой в виде электрического сигнала представлены на рисунке 4.1 в. Далее электрический сигнал преобразуется в цифровой код (10-битное значение яркости для каждого пикселя) и выполняется его вейвлет-преобразование (рисунок 4.1 г).

Частотный анализ вейвлет-преобразования позволяет выделить точки контура дефекта для каждого сканирования (рисунок 4.1 д). Выделенная точка контура дефекта характеризуется яркостью и номером пикселя, который соответствует местоположению возникновения оптических искажений в листовом стекле. На рисунке 4.1 д показаны результаты сканирования в момент времени t_l характеризуемые точками со значениями 3149 и 3156 пикселей. Происходит накопление точек дефекта по проведенным сканированиям в моменты времени t_i , $i = \overline{1,5}$, а также информации о среднем значении яркости подсветки между точками контура.

На основе множества точек дефекта формируются вектора [7], и в результате получается закодированный в векторной форме контур дефекта (рисунок 4.1 е). Точка дефекта со значением 3149, определенная при сканировании в момент времени t_l , является начальной точкой контура.

Контур дефекта в векторной форме служит для классификации типа дефекта, а информация о среднем значении яркости между точками используется для определения конкретного типа дефекта.

На рисунке 4.2 представлена блок-схема предложенного алгоритма локализации дефекта в листовом стекле. В каждый момент времени определяется положение не более чем одного дефекта в ленте стекла. Для определения большего количества дефектов в алгоритме используются дополнительные переменные и динамические массивы данных: количество и характеристики неоднородностей очередного сканирования линейной видеокамерой; количество дефектов в процессе обработки, количество точек в каждом дефекте и совокупности их характеристик.

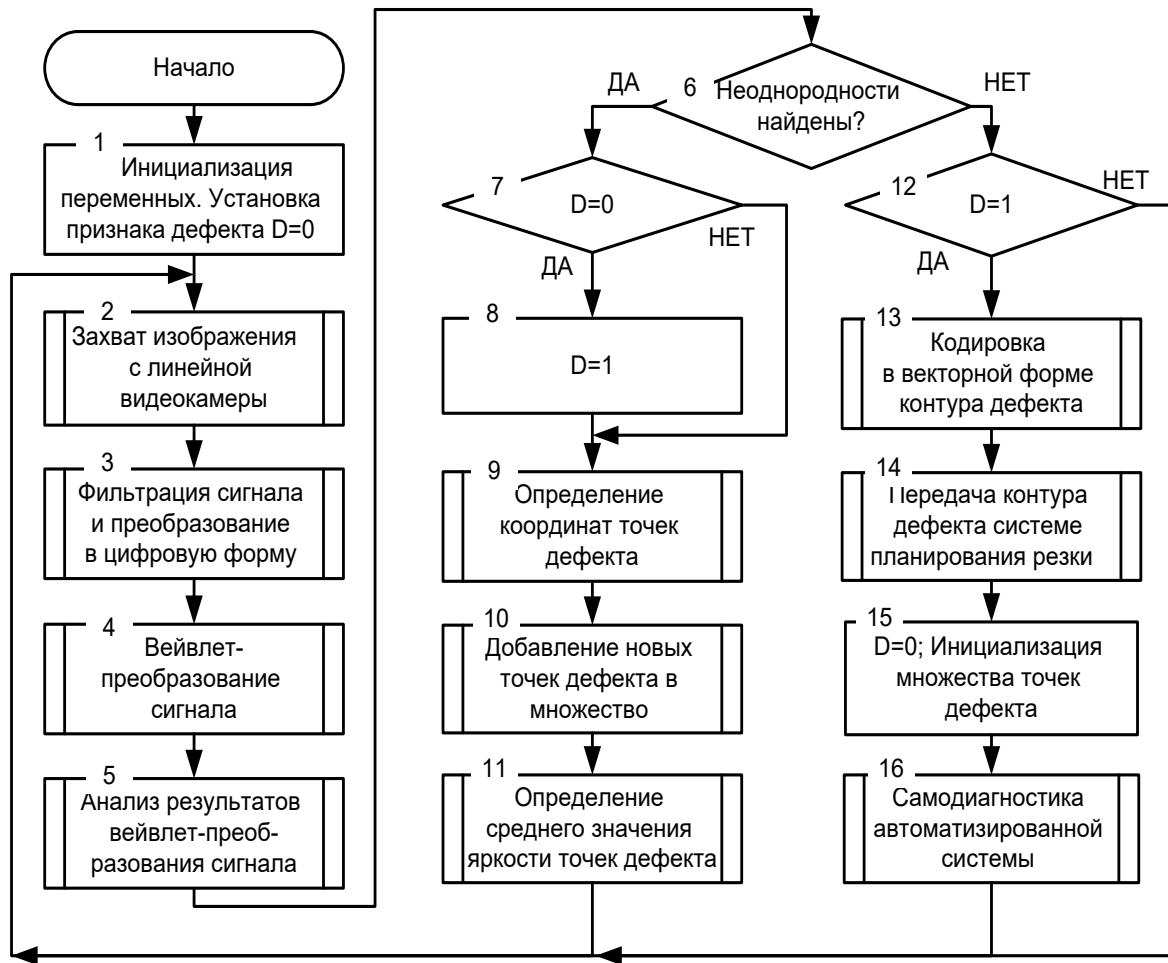


Рисунок 4.2 - Блок-схема оптико-вейвлетного алгоритма локализации дефекта

В начале работы алгоритма в блоке 1 инициализируются служебные переменные и устанавливается признак отсутствия дефекта, $D = 0$. Последующие шаги выполняются итерационно с периодичностью от 500 до 1000 раз в секунду, в зависимости от скорости движения ленты стекла. Блок 2 обеспечивает захват изображения с линейной видеокамеры. Далее, в цифровом сигнальном процессоре сигнал фильтруется и преобразуется в цифровую форму. При наличии дефекта в стекле блоки 3 и 4 с помощью вейвлет-преобразования формируют признак наличия неоднородностей в стекле.

Условия в блоках 6, 7, 12 разделяют алгоритм на три ветви. Первая из них обеспечивает переход к блоку 2 для очередного сканирования при невыполнении условий в блоках 6 и 12. Это соответствует отсутствию неоднородностей и признака дефекта в стекле. Данный режим работы алгоритма является основным.

Вторая ветвь, реализуемая блоками 7 – 11, выполняется в случае первого появления неоднородностей. Устанавливается признак наличия дефекта в стекле, $D=1$. Продолжается заполнение множества точек дефекта до тех пор, пока весь контур дефекта не будет описан.

Третья ветвь выполняется при следующем сканировании, после завершения описания точек контура дефекта. Блок 13 преобразует множество точек контура дефекта в векторную форму, которая используется для дальнейшего распознавания типа дефекта. Блок 14 обеспечивает передачу координат дефекта в автоматическую систему планирования раскроя ленты стекла. После этого в блоке 15 устанавливается признак отсутствия дефекта $D=0$. Удаляется информация о количестве и параметрах точек контура дефекта. Блок 16 проверяет корректность процедуры инициализации данных об обработанном дефекте и обеспечивает подготовку к обработке следующего дефекта.

Алгоритм является основой разработки программного обеспечения, позволяющего одновременно локализовать до 32 дефектов для одной линейной видеокамеры. Локализация дефекта в автоматическом режиме происходит не более чем за 0,01 секунды (процессор с частой 4ГГц).

4.3. Эвристическо-продукционный алгоритм определения видов точечных дефектов листового стекла

Для компьютерного анализа изображений предложена комплексная процедура автоматической диагностики точечных дефектов листового стекла, которая включает следующие этапы [495].

Этап 1. Оптико-техническое сканирование. Захват и фильтрация изображений с каждой из группы линейных видеокамер и формирование из этих изображений общего изображения исследуемого участка ленты стекла [390].

Этап 2. Локализация дефекта. Анализ полученного изображения с использованием вейвлет-преобразования с целью выявления наличия точечного дефекта и определения его координат в ленте стекла [388, 390].

Этап 3. Взаимодействие с базой данных (БД). Сохранение в БД полученной информации и передача координат точечного дефекта в систему автоматического раскроя и резки ленты стекла.

Этап 4. Определение типа контура точечного дефекта с использованием искусственной нейронной сети (ИНС) [390].

Этап 5. Классификация типа точечного дефекта с использованием эвристических правил [390, 392].

Этап 6. Диагностика причин возникновения дефекта листового стекла на основе применения экспертной системы [393].

На основе данной комплексной процедуры разработано алгоритмическое обеспечение и программный комплекс автоматической диагностики причин возникновения точечных дефектов листового стекла.

Алгоритм диагностики точечных дефектов. Алгоритм идентификации точечных дефектов листового стекла выполняется непрерывно в режиме РВ и взаимодействует с БД автоматизированной системы управления многостадийным производством листового стекла. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 4.3.

При включении автоматической системы идентификации точечных дефектов в блоке 1 выполняется инициализация глобальных переменных и динамических массивов. Признаку D, свидетельствующему о наличии дефекта на изображении, присваивается значение 0 (дефект отсутствует).

Затем в цикле начинает выполняться компьютерная обработка изображений ленты стекла с периодичностью 250 - 1000 раз в секунду, в зависимости от скорости движения ленты стекла. В блоке 2 выполняется захват сигнала с каждой из группы линейных видеокамер. Цифровой сигнальный процессор обеспечивает фильтрацию и преобразование сигнала в цифровую форму, которая представляет собой массив значений яркости пикселей изображения стекла, захваченных линейной видеокамерой. Блок 3 обеспечивает обработку краев изображений и формирование из них общего изображения исследуемого участка ленты стекла (этап 1).

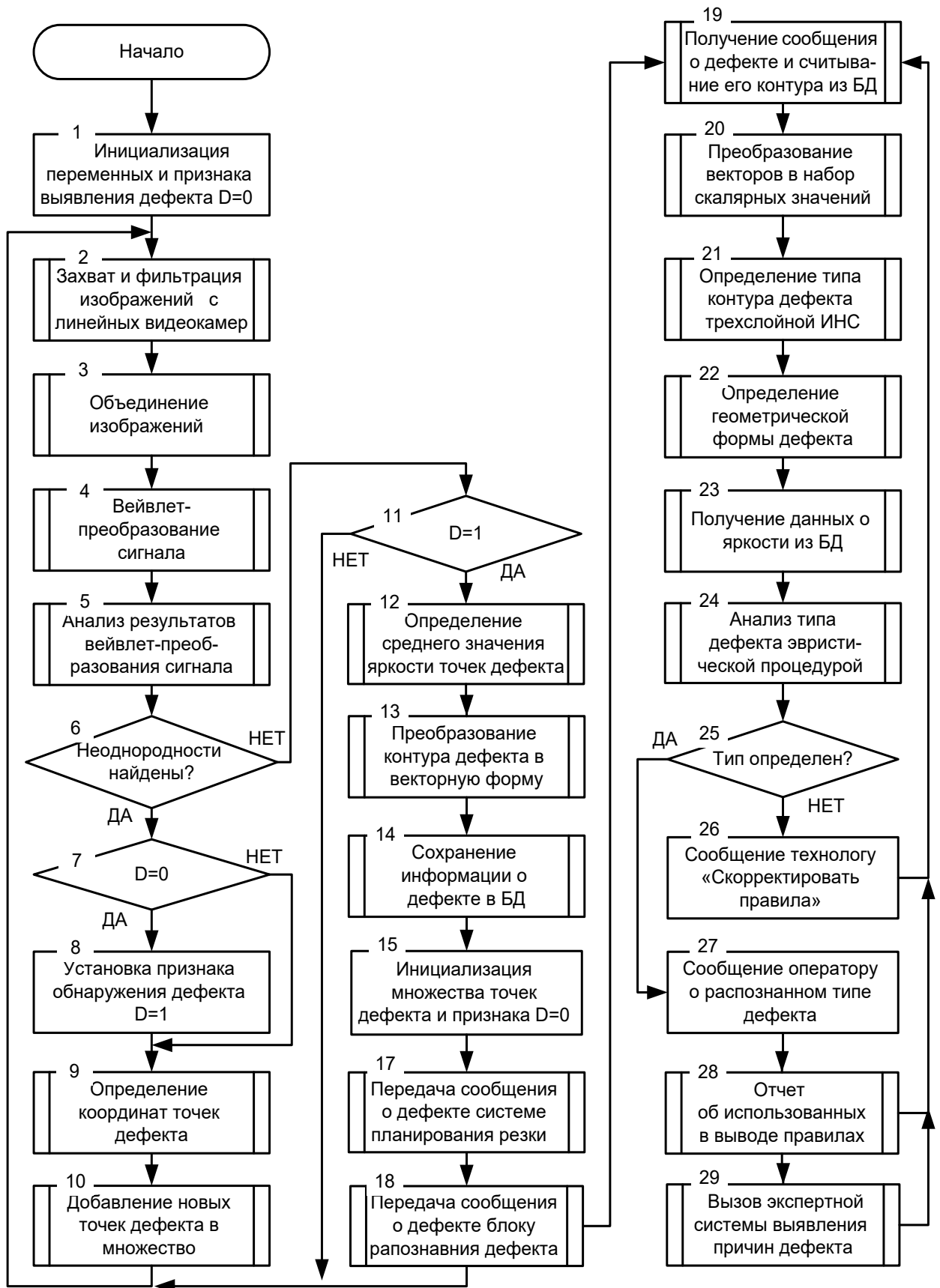


Рисунок 4.3 - Блок-схема алгоритма диагностики точечных дефектов листового стекла

Вейвлет-преобразование полученного обобщенного изображения (массив значений яркости) исследуемого участка ленты стекла выполняется в блоке 4. Блок 5, используя вейвлет-преобразование анализирует сигнал на наличие частотных искажений следования полос муара, формирует в случае их выявления признак наличия неоднородностей в стекле.

Отрицательные выходы из условий блоков 6 и 11 соответствуют случаю отсутствия дефекта на рассматриваемом участке ленты стекла. Выполняется переход к блоку 2 для захвата изображения следующего участка ленты стекла.

При выявлении неоднородности (блок 6, условие «да») блок 7 проверяет относится ли она к новому дефекту (условие «да», $D=0$) или является продолжением дефекта, обнаруженного на предыдущем шаге сканирования (условие «нет», $D=1$). Если неоднородность относится к новому дефекту, то в блоке 8 устанавливается признак наличия дефекта в стекле ($D=1$). Затем в блоке 9 определяются значения координат точек дефекта. Выявленные точки добавляются в множество точек дефекта (блок 10). Затем выполняется переход к блоку 2 и продолжается заполнение множества точек контура дефекта, пока не будет описан весь контур. Блоки 4-10 реализуют второй этап процедуры.

Если на текущей итерации не обнаружена неоднородность, а на предыдущей она имела место (блок 11, условие «да»), то полагается, что по дефекту получены все необходимые данные для дальнейшей его классификации (определения типа) (блок 18) и использовании при решении задачи рационального раскроя ленты стекла (блок 17). В блоке 12 определяется среднее значение яркости точек дефекта, которое необходимо блоку 23 для определения его типа. В блоке 13 точки контура дефекта преобразуются в вектора. Каждый вектор записывается в виде комплексного числа $a+ib$ (элементарных векторов), где a – смещение точки по оси X , а b – смещение по оси Y . Смещение определяется относительно предыдущей точки контура. В результате получается множество: $\Phi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_N\}$, где $\varphi_i = a_k + ib_k$ – элементарный вектор. Полученное множество Φ и средние значения яркости точек дефекта, сохраняются в БД блоком 14. Блок 15 устанавливает признак

отсутствия дефекта $D=0$, удаляет текущую информацию о параметрах точек контура дефекта и передает управление блоку 2.

При получении асинхронного сообщения о новом дефекте блок 19 считывает информацию о контуре дефекта из БД. В блоке 20 выполняется преобразование элементарных векторов контура дефекта в набор скалярных значений по числу нейронов входного слоя ИНС. Элементарные векторы переводятся в скалярный вид $\phi_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$.

В блоке 21 полученное множество скалярных значений $R = \{\phi_1, \phi_2 \dots \phi_N\}$ подается на вход ИНС для классификации типа контура. Нейроны ИНС используют линейную функцию активации $f(x) = x$. ИНС обучается по алгоритму обратного распространения ошибки [390]. Она состоит из 2048 нейронов входного слоя, 655 – промежуточного слоя и двух – выходного слоя. Активация первого выхода соответствует дефекту с «гладким контуром», а второго – «контур с изломами».

Для определения типа дефекта необходима дополнительная информация о среднем значении яркости точек дефекта. Ее считывает из БД блок 23. На основе эвристических правил [390] в блоке 24 определяется тип дефекта. Набор эвристических правил может изменяться и дополняться. Если тип дефекта не определен (блок 25, условие «нет»), то блок 26 передает автоматизированному рабочему месту технолога сообщение о необходимости корректировки эвристических правил. Если тип дефекта определен, то эта информация сохраняется в БД и на автоматизированное место оператора производства листового стекла поступает сообщение с описанием дефекта (блок 27). Блок 28 обеспечивает формирование отчета для технолога, о примененных эвристических правилах для определения типа дефекта.

Блок 29 обеспечивает вызов экспертной системы для диагностики причин возникновения дефекта и поддержки принятия решений по корректирующим воздействиям и выработки мероприятий по увеличению объема выпуска стекла марки М0. Экспертная система использует

дополнительные данные о значениях технологических параметров многостадийного производства листового стекла.

Компоненты программного обеспечения комплексной процедуры диагностики точечных дефектов листового стекла реализуются на нескольких вычислительных узлах (ВУ). В зависимости от оперативности решения задач к ВУ предъявляются различные требования по производительности. ВУ 1 выполняет блоки 1, 4 – 18 с периодичностью 250 – 1000 раз в секунду в зависимости от скорости движения ленты стекла, взаимодействуя с ВУ 2 (блок 2, 3). ВУ 3 обеспечивает функционирование БД MSSQL Server с использованием языка структурированных запросов SQL. ВУ 1 - 3 функционируют в реальном времени под управлением операционной системы Windows с расширением RTX компании Interval Zero. ВУ 4 выполняет блоки 19-28, а ВУ 5 – блок 29, обеспечивая определение причин возникновения дефекта [394].

Определение типа дефекта является неформализованной задачей, которую невозможно решить классическими математическими методами. Поэтому возникает необходимость использовать экспертные системы [395 – 397]. Для построения экспертной системы необходимо сформировать базу знаний и определить механизм вывода. База знаний содержит правила, описывающие как система должна определять тип дефекта листового стекла по набору признаков. Признаки дефекта определяются по информации, полученной от оптических датчиков, сканирующих ленту стекла в непрерывном режиме. Правила формируются после получения информации от эксперта по предметной области, в данном случае от эксперта по дефектам листового стекла. Существует несколько способов представления базы знаний: продукционная модель, фреймы, семантические сети. Для решения нашей задачи была выбрана продукционная модель представления знаний, так как она позволяет представлять знания на языке, близком к человеческому и вполне эффективна для решения поставленной задачи.

Механизм вывода показывает, как система должна обрабатывать данные правила для получения результата ее работы.

База знаний определения типа дефекта в листовом стекле содержит набор правил, в соответствии с которыми выполняется сравнение выделенной информации о дефекте. У ряда дефектов можно выделить ядро, которое характеризуется центральным расположением и отличными от остальной части дефекта свойствами. Исходной информацией для реализации правил экспертной системы являются следующие характеристики: I - интенсивность пропускания светового потока ядром дефекта, δ - наличие искажений вокруг ядра, φ - форма ядра, κ - тип контура, размеры ядра (p - ширина, l - длина) и общие размеры дефекта. Все эти характеристики хранятся в базе данных Oracle Time Teen автоматизированной системы поиска и распознавания типа дефекта листового стекла и обновляются в режиме реального времени [394].

Ниже приведены правила определения типов дефектов в формализованном виде.

ЕСЛИ ($\varphi = \text{«круг»}$ ИЛИ $\varphi = \text{«овал»}$) И $\kappa = \text{«гладкий контур»}$ И ($I > 90\%$ И $I < 100\%$) И $l \geq p$ И ($\delta = true$ ИЛИ $\delta = false$), ТО дефект = «Пузырь».

ЕСЛИ $\varphi = \text{«ломаная форма»}$ И $\kappa = \text{«контур с изломами»}$ И ($I > 70\%$ И $I < 85\%$) И $l >> p$ И $\delta = true$, ТО дефект = «Свиль».

ЕСЛИ ($\varphi = \text{«круг»}$ ИЛИ $\varphi = \text{«овал»}$) И $\kappa = \text{«гладкий контур»}$ И ($I > 50\%$ И $I < 85\%$) И $l \geq p$ И ($\delta = true$ ИЛИ $\delta = false$), ТО дефект = «Сульфатный пузырь».

ЕСЛИ $\varphi = \text{«ломаная форма»}$ И $\kappa = \text{«контур с изломами»}$ И ($I > 0\%$ И $I < 40\%$) И $l \geq p$ И $\delta = true$, ТО дефект = «Включение».

ЕСЛИ $\varphi = \text{«ломаная форма»}$ И $\kappa = \text{«контур с изломами»}$ И ($I > 300\%$ И $I < 7040\%$) И $l \geq p$ И $\delta = false$, ТО дефект = «Матовость поверхности».

ЕСЛИ $\varphi = \text{«круг»}$ И $\kappa = \text{«гладкий контур»}$ И $I = 0\%$ И $l = p$ И $\delta = false$, ТО дефект = «Капля олова».

ЕСЛИ φ = «ломаная форма» И κ = «контур с изломами» И $I = 0\%$ И $l = p$ И $\delta = false$, ТО дефект = «Оксид олова».

По этим правилам экспертная система классифицирует тип дефекта. Указанные выше правила хранятся в базе знаний текстовом виде, что позволяет ее дополнять и изменять, не затрагивая систему в целом. Эти правила интерпретируются системой в байт-код при старте и в дальнейшем выполняются в режиме реального времени.

4.4. Аппаратурно-техническое и программно-информационное обеспечение автоматизированной системы диагностики точечных дефектов листового стекла

Процедура локализации дефектов в стекле включает этапы оптического сканирования ленты стекла и компьютерной обработки отсканированного изображения. Локализация дефектов осуществляется с помощью оптико-вейвлетного метода, который включает этапы:

- 1) захват электрического сигнала с видеокамеры;
- 2) фильтрация электрического сигнала;
- 3) вейвлет-преобразования сигнала;
- 4) накопление информации для получения контура дефекта.

Для автоматизации процедуры локализации дефектов в листовом стекле предложена автоматизированная система. Ее аппаратурно-техническая схема представлена на рисунке 4.4. В ее состав входит несколько линейных видеокамер, модуль структурированной подсветки, датчик скорости движения ленты стекла и светозащищенный корпус системы, не допускающий проникновения света извне.

Линейные видеокамеры устанавливаются над лентой стекла, а модуль структурированной подсветки под ней. Количество линейных видеокамер зависит от ширины стекла, которые располагаются поперек движения ленты стекла. Захват электрического сигнала с видеокамер и дальнейшая его

обработка выполняется итерационно с заданной частотой. Каждая итерация запускается срабатыванием датчика движения ленты стекла.

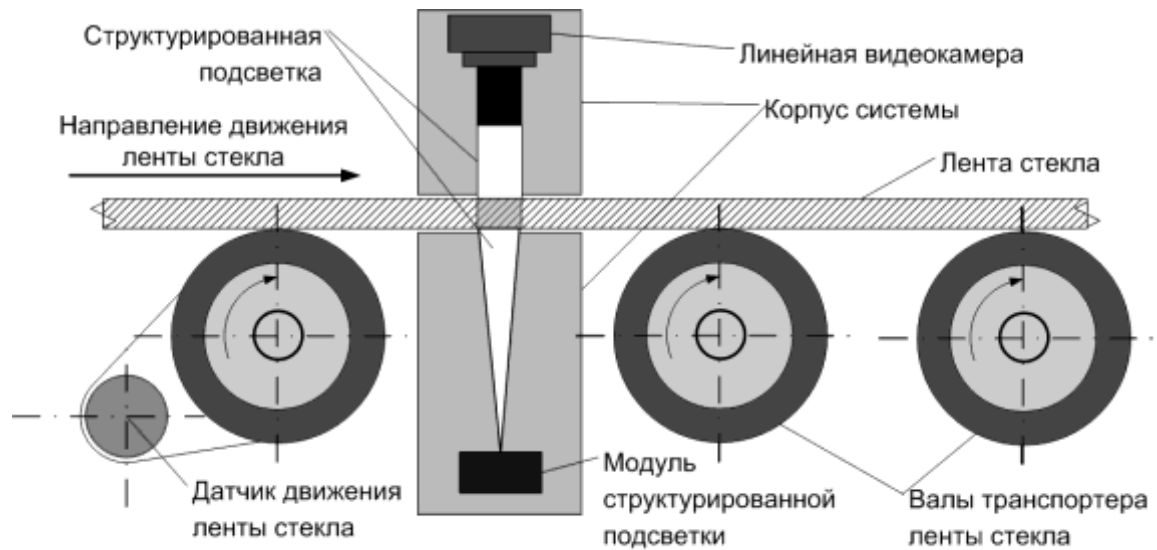


Рисунок 4.4 - Аппаратно-техническая схема автоматизированной системы сканирования точечных дефектов в листовом стекле

Рассмотрим физико-техническую сущность принципов и режимов функционирования автоматизированной системы. Вокруг точечного включения в листовом стекле возникают оптические искажения, вызываемые изменением внутренней структуры и рельефа стекла (изменение плотности, состава и др.). За счёт выявления этих искажений определяется форма дефекта, по которой осуществляется его идентификация.

Для выявления оптических искажений в листовом стекле используются структурированная подсветка стекла и линейная видеокамера с промышленным исполнением оптической системы (компания DALSA). На качество электрического сигнала с видеокамеры влияет, в основном, абберация (искажения света, вызванные оптической системой) линз [399, 400]. Поэтому для разработанной автоматизированной системы сканирования использованы промышленные видеокамеры, которые значительно снижают влияние эффекта аббераций.

При исследованиях использовалась линейная видеокамера Piranha2 с разрешением 4096 x 1 пикселей (с размером пикселя 10 мкм) и скоростью

передачи данных 80 Мб/с, которая обеспечивает сканирование дефектов в стекле шириной до 0,5 метра (одному пикселю изображения соответствует 0,125 мм поверхности стекла). Такая точность является достаточной, так как в соответствии с ГОСТ Р 54170-2010 для обеспечения качества листового стекла марки М1 не допускаются дефекты с линейными размерами более чем 0,5 мм.

Структурированная подсветка получается наложением маски на источник равномерного освещения (модуль структурированной подсветки), установленный под транспортером ленты стекла. Для сканирования дефектов в листовом стекле использована структурированная подсветка «зебра» в виде чередующихся черных и белых полос.

Ширина полосы в подсветке выбирается эмпирически на основе расстояния от ленты стекла до источника излучения и видеокамеры. При освещении дефекта структурированной подсветкой структура оптического изображения изменяется из-за оптических искажений, внесенных этим дефектом.

Пример оптического изображения дефекта «закрытый пузырь», который искажает подсветку, приведен на рисунке 4.5. На нем показано белой горизонтальной линией место сканирования линейной видеокамерой, стрелкой направление движения ленты стекла, а также шкала масштабной линейки в пикселях линейной видеокамеры (pixel position).

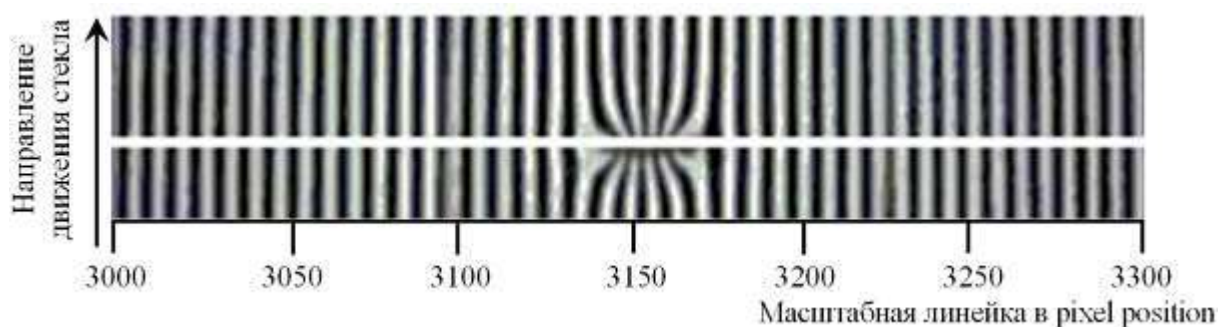


Рисунок 4.5 - Оптическое изображение дефекта «закрытый пузырь» над структурированной подсветкой «Зебра»

В области дефекта изменяется интенсивность света и частота следования полос в результате оптических искажений светового потока через подсветку «зебра». Электрический сигнал оптического изображения подсветки «зебра»,

искаженной дефектом «пузырь» и зафиксированный линейной видеокамерой, имеет вид, представленный на рисунке 4.6. Видеокамера преобразует электрический сигнал в 10-битное значение яркости для каждого пикселя, которое передается по протоколу Base Camera Link в автоматизированную систему на дальнейшую обработку.

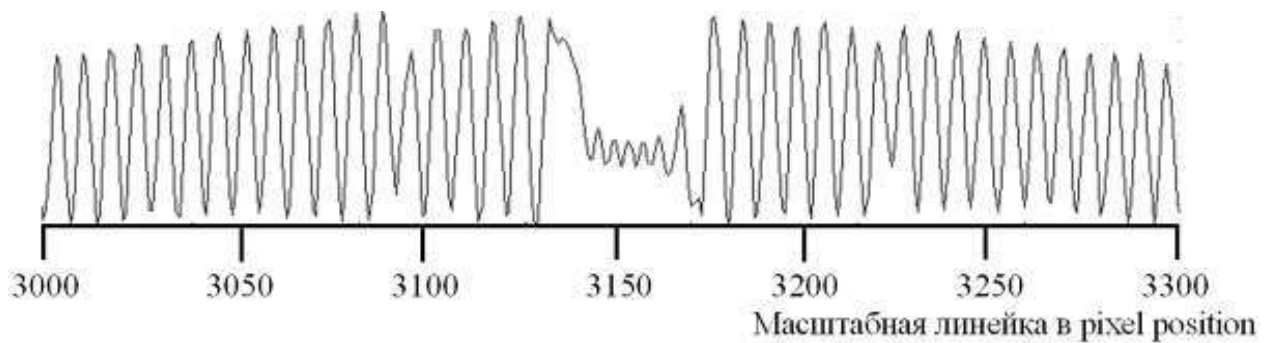


Рисунок 4.6 - Искженный электрический сигнал с видеокамеры из-за расположения дефекта «Закрытый пузырь» над структурированной подсветкой

Далее для локализации дефекта в листовом стекле выполняется вейвлет-преобразование электрического сигнала с использованием вейвлета Хаара (рисунок 4.7).

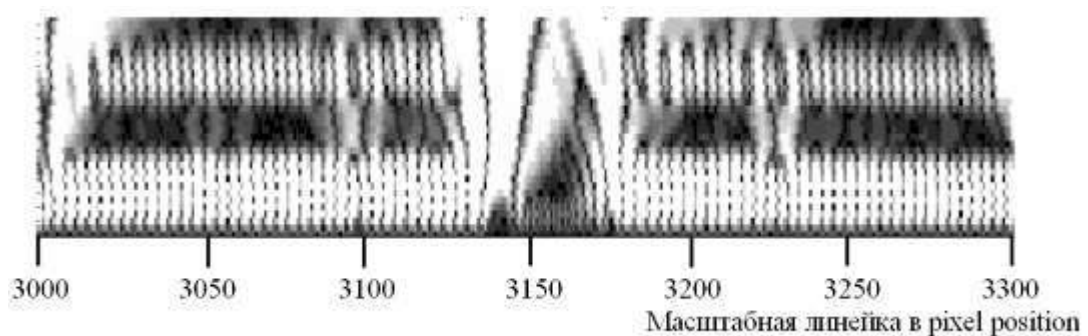


Рисунок 4.7 - Вейвлет-преобразование электрического сигнала

Электрический сигнал с видеокамеры является гладким, поэтому можно установить достаточно небольшое количество уровней его дискретизации [401, 402]. При максимальном количестве масштабных строк равно 5, количество уровней дискретизации составит $2^5=32$, а интервал дискретизации данных $1/32$. Результат вейвлет-преобразования электрического сигнала искаженной подсветки (см. рисунок 4.6) представлен на рисунке. 4.7.

Из рисунка 4.7 видно, что в области дефекта увеличивается частота сигнала, которую необходимо выделить из фонового (не искажённого) сигнала, имеющего более низкую частоту. Используются только масштабные строки, полоса частот которых укладывается в выбранные эмпирическим путем (на основании измерения образцов) рамки. В результате получается отфильтрованный сигнал, содержащий только сведения об искажениях сигнала. На рисунке 4.7 видны признаки неоднородности между 3135 и 3170 пикселями, на основании которых локализуется дефект [402].

4.5. Выводы

Раздел 4.1. Рассмотрены основные дефекты листового стекла. Определены способы, обеспечивающие повышение качества листового стекла.

Раздел 4.2. Предложенная комплексная вейвлет-нейро-эвристическая процедура обеспечивает диагностику наиболее часто встречающихся типов дефектов листового стекла и формирование электронной карты дефектов, которая необходима для эффективного функционирования системы автоматического раскроя листового стекла в реальном времени. Информация о причинах возникновения дефектов листового стекла используется при создании автоматизированных система повышения квалификации производственного персонала и при принятии решений по управлению многостадийным производством высококачественного листового стекла.

Раздел 4.3. Предложенный подход к распознаванию точечных дефектов в стекле обеспечивает определение локализации наиболее часто встречающихся типов дефектов размером более 0,5 мм на основе применения линейных видеокамер средней ценовой категории.

Раздел 4.4. Предложено аппаратно-техническое и алгоритмическое обеспечение, которое может составить основу разработки отечественной системы автоматизированного обнаружения и распознавания дефектов листового стекла.

ГЛАВА 5. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

5.1. Содержательная и математическая постановки задачи иерархического управления энергоресурсоэффективностью производства высококачественного листового стекла

Одной из наиболее важных проблем для реализации концепции Industry 4.0 на современных автоматизированных предприятиях с непрерывным производством является принятие в режиме близком к реальному времени обоснованных решений по управлению функционированием производства для удовлетворения индивидуальных требований потребителей [115]. Для ее решения необходимо решение задач управления:

- 1) ускорение адаптации конечной продукции к потребностям потребителя,
- 2) снижение себестоимости продукции при выпуске малых партий продукции,
- 3) уменьшение времени производства продукции,
- 4) снижение времени переналадки производства на выпуск другого вида продукции.

Объектом исследования в данной работе является автоматизированное многостадийное производство высококачественного листового стекла.

На основе стратегических целей предприятия задается множество целей управления непрерывным производством $\{G\}$, где каждая цель $G_i(K, C, T)$, $i = \overline{1, n_g}$ определяется множеством критериев управления $\{K\}$, множеством затрат на управление $\{C\}$ и множеством периодов времени управления $\{T\}$. Анализ целей и запросов потребителей для конкретного производства позволяет определить целевые значения критериев управления. Анализ производства дает оценки затрат на управление и их временные периоды.

Общая задача управления непрерывным производством листового стекла на основе целей G_i , $i = \overline{1, n_g}$ может быть записана в обобщенном виде

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((a_{ij} k_{ij}(t))) \rightarrow \max, \quad \sum_{j=1}^{m_i} a_j = 1,$$

где a_{ij} - коэффициент значимости j -го критерия $j = \overline{1, m_i}$ цели управления G_i , k_{ij} - значение j -го критерия $j = \overline{1, m_i}$ цели управления G_i , t - период выполнения критерия.

Ограничениями задачи управления являются: себестоимость c_j и время t_j производства продукции

$$c_j(W, V, \bar{U}, \bar{X}, \bar{Y}, \bar{K}, T) < c_j^{min}$$

$$t_j(W, V, \bar{U}, \bar{X}, \bar{Y}, \bar{K}, C) < t_j^{min}$$

где W – объект управления (ОУ), V – система управления (СУ), $\bar{U}$ – вектор управляющих воздействий, $\bar{X}$ – возмущения, воздействующие на ОУ, $\bar{Y}$ – состояние ОУ (вектор выходных производственных и технологические переменных), $\bar{K}$ – критерии управления ОУ, $\bar{C}$ - затраты на управление, T – период управления.

Представить решение общей задачи управления в аналитическом виде на пространстве параметров и характеристик состояний ОУ практически невозможно. Поэтому необходимо провести декомпозицию общей задачи управления на множество взаимосвязанных задач управления, которые могут быть записаны в аналитическом виде.

В работах Д. Нортон и Р. Каплан предложено деление дерева целей в системе сбалансированных показателей на четыре перспективы: финансы (Ф), клиенты (К), внутренние бизнес-процессы (ВБП), развитие (Р) [403]. Анализ функционирования предприятия по производству листового стекла и компании «Интехпроект» [404] позволил определить основные цели управления автоматизированным многостадийным производством высококачественного листового стекла, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Цели и показатели производства листового стекла

№	Цель	Перспектива	Показатель 1, наименование в модели	Показатель 2, наименование в модели
1	Рост прибыли	Ф	Прибыль, p1_profit	
2	Увеличение стоимости компании	Ф	Стоимость акции, p2_share_price	
3	Увеличение количества клиентов	Ф	Количество клиентов, p3_Number_of_clients	Количество привлеченных клиентов, p3_Number of attracted clients
4	Сокращение издержек	Ф	Издержки на запасы (% от общих издержек), p4_Inventory_cost	
5	Сохранение клиентской базы	К	Процент клиентов, обратившихся повторно, p5_pc_repeat_customers	
6	Повышение удовлетворенности клиентов	К	Процент недовольных клиентов, p6_pc_dissatisfied_customers	Увеличение стоимости одной покупки, p6_Increase_in_the cost of one purchase
7	Привлечение клиентов	К	Количество привлеченных клиентов, p3_Number_of_attracted_clients	Затраты на привлечение одного клиента, p7_Cost_customer_acquisition
8	Точное планирование производства	ВБ П	Процент заявок о потребностях в сырье, представленных в срок, p8_orders_of_materials_on_time	Процент заявок о потребностях в ТМЦ, представленных в срок, p8_orders_of_TMC_on_time
9	Закупка качественного сырья и ТМЦ	ВБ П	Доля брака ТМЦ, p9_pc_defective_of_materials	Доля брака сырья, p9_pc_defective_of_TMC
10	Усиление контроля за ТП	ВБ П	Процент проведенных проверок из запланированных, p10_pc_scheduled_checks	
11	Своевременная поставка ТМЦ и сырья	ВБ П	Процент нарушений сроков доставки сырья, p11_pc_send_material	Процент нарушений сроков доставки ТМЦ, p11_pc_send TMC
12	Своевременная отгрузка стекла	ВБ П	Процент продукции, отгруженной в срок, p12_shipment_in_time	
13	Оптимизация запасов ТМЦ	ВБ П	Процент запасов, запланированных к выдаче, p13_pc_material	

№	Цель	Перспектива	Показатель 1, наименование в модели	Показатель 2, наименование в модели
14	Расширение номенклатуры стекла	ВБ П	Количество новых видов стекол, p14_new_glass	
15	Уменьшение затрат на управление	ВБ П	Экономия затрат на управление, p15_min_control	
16	Повышение качества листового стекла	ВБ П	Количество гарантийных случаев, p16_defects	Процент жалоб клиентов на качество продукции, p16_pc_complaints
17	Повышение удовлетворенности персонала	Р	Количество уволенных сотрудников, p17_Number_of_dismissed_employees	
18	Повышение квалификации сотрудников	Р	Количество мероприятий по повышению квалификации, p18_N_prof_development_events	Процент квалифицированных сотрудников, p18_pc_prof_qualified_employees
19	Модернизация производства	Р	Затраты на модернизацию производства, p19_Costs_for_the_modernization_of_production	Количество мероприятий по модернизации производства, p19_Number_of_measures_to_modernize_production
20	Экономия энергоресурсов	Р	Количество мероприятий по экономии энергоресурсов, p20_Number_of_energy_saving_measures	Затраты на экономию энергоресурсов, p20_Energy_Saving_Costs
21	Развитие информационной системы	Р	Количество внедренных информационных подсистем, p21_Number_of_implemented_information_subsystem	Затраты на модернизацию информационной системы, p21_Information_system_upgrade_costs
22	Уменьшение стоимости процессов	Р	Экономия стоимости процессов, p22_Process_Cost_Savings	Затраты на модернизацию системы управления, p22_The_cost_of_modernizing_the_control_system
23	Проведение НИОКР по разработке новых продуктов	Р	Количество внедренных новых видов продукции, p23_Number_of_introduced_new_products	Затраты НИОКР, p23_R_and_D_costs
24	Проведение НИОКР по разработке новых технологий	Р	Количество внедренных новых технологий, p24_Number_of_new_technologies_introduced	Затраты НИОКР, p24_costs_new_technology

Для каждой цели в таблице 5.1 приведены показатели, которые определяют выполнение цели. Взаимосвязи целей представлены на стратегической карте целей (СКЦ) рисунке 5.1, разработанной в среде Business Studio.

В системе Business Studio стратегическая карта целей используется для общего контроля достижения всех целей. В процессе функционирования предприятия при получении новых значений показателей из ERP-системы за определенный период автоматически рассчитываются оценки достижения целей. Эти оценки сравниваются с граничными условиями цели. При недостижении цели в заданный период времени можно провести анализ показателей цели. Декомпозиция показателей позволяет выявить показатель, который вызвал отклонение. Графики изменения динамики показателей показывают состояние показателей по каждому периоду на фоне заданных границ нормальных и тревожных значений.

СКЦ является визуальным представлением системы сбалансированных показателей (ССП) [405]. При этом СПП определяются стратегическими целями в нескольких перспективах и показателями контроля степени достижения этих целей. Для устойчивого функционирования такой системы необходимо балансирование между значимостью финансовых и нефинансовых показателей, а также противоречащими целями «Прибыль-Капитализация» (перспектива финансы), «Цена-Качество» (перспектива клиенты), «Быстро-Дешево-Качественно» (перспектива внутренние бизнес-процессы), «Инновации-Серийное производство» (перспектива развитие).

Успех в достижении целей обеспечивается благодаря реализации сбалансированной стратегии. СПП должна быть проецирована на всю организацию разработкой индивидуальных целей подразделений в рамках корпоративных стратегий. Основное внимание уделяется снижению стоимости, улучшению качества и сокращению временного цикла существующих процессов [406].

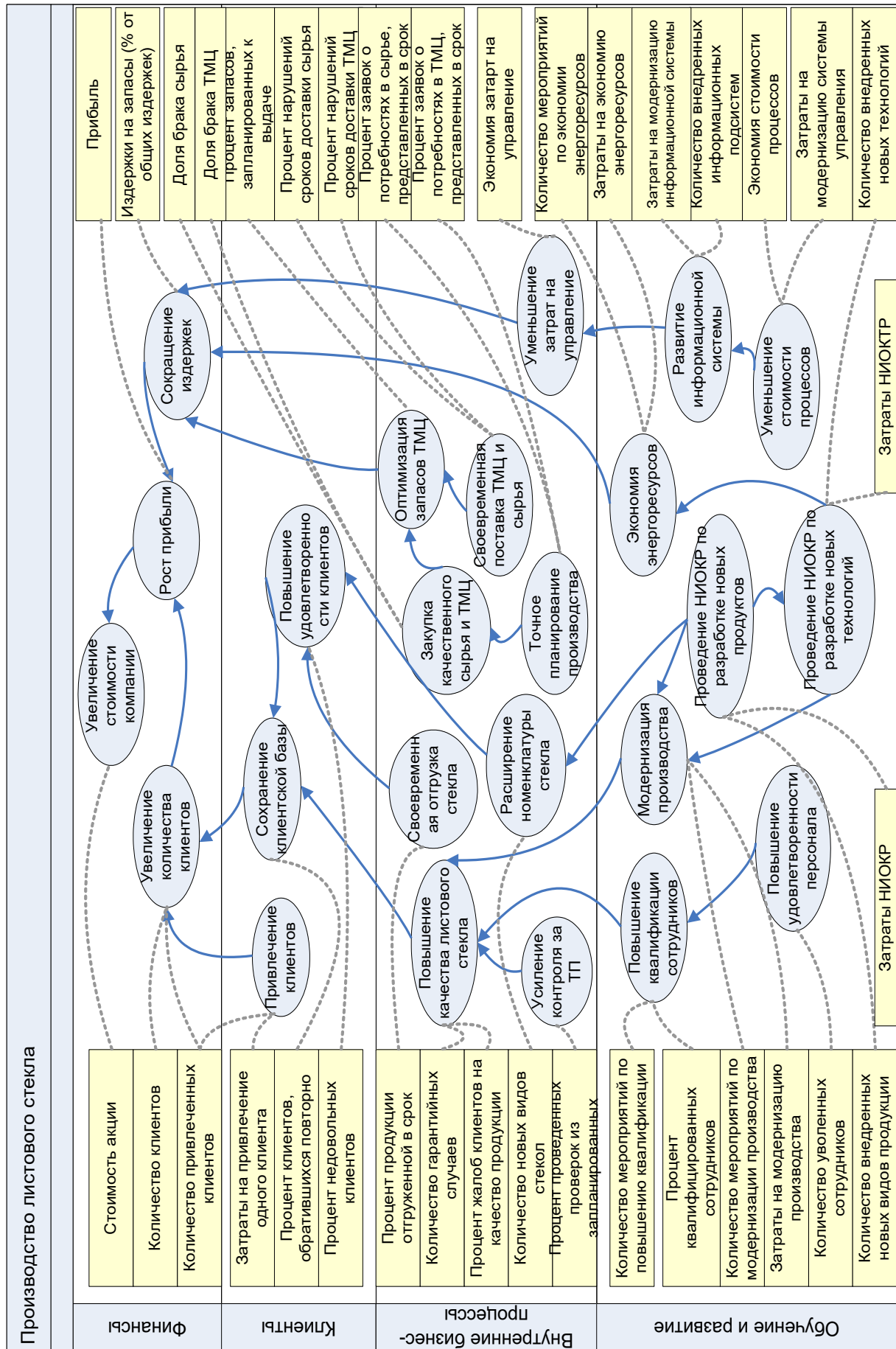


Рисунок 5.1 - Стратегическая карта целей производства листового стекла

Традиционно оптимальный баланс между противоречиями «Быстро-Дешево-Качественно» в виде формулировки сбалансированных показателей определяется экспертами, однако в сложных системах применение математического моделирования позволяет существенно повысить качество решений, принимаемых экспертами.

Для анализа взаимосвязей показателей и определения допустимых значений нормальных и тревожных границ каждого из них необходима разработка на основе СКЦ математической модели функционирования производства высококачественного листового стекла. Такая математическая модель позволит решать задачи многоуровневого оптимального управления энергоресурсоэффективностью производства высококачественного листового стекла.

5.2. Вероятно-статистический алгоритм анализа жизненного цикла многостадийного производства высококачественного листового стекла

Высокоэффективное функционирование предприятий с непрерывным характером производства обеспечивается сокращением потерь и затрат на производство при повышении качества выпускаемой продукции. Потери при непрерывном производстве во многом связаны с возникновением нештатных ситуаций. Отсутствие значительных средств на коренную реконструкцию на основе новейших технологий и оборудования вынуждает предприятия для повышения рентабельности ограничиваться частичной модернизацией производства и повышением квалификации технологов и операторов непрерывных производств [499].

В типовой классификации уровней промышленной безопасности производственных процессов [407 – 409] определены уровни: 1) процесс проектирования, 2) процесс автоматического управления, 3) процесс операторского управления, 4) действие системы противоаварийной защиты, 5) действие активной защиты, 6) действие пассивной защиты, 7) воздействия на

объекты, окружающие предприятие. Такая классификация не учитывает требований методических указаний РД 09-536-03 «О порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на химико-технологических объектах» для опасных производственных объектов I, II и III классов опасности [410]. В оперативной части ПЛАС определены три уровня аварийных ситуаций: «А» - в пределах одного блока объекта (цеха, установки, производственного участка), являющегося структурным подразделением организации, «Б» - переход за пределы одного блока объекта (цеха, установки, производственного участка) и развитие ее в пределах организации, и «В» - развитие и выход за пределы территории организации, возможность воздействия поражающих факторов на население близлежащих населенных пунктов и другие организации (объекты), а также окружающую среду. В действующем в настоящее время постановлении Правительства РФ от 15.09.2020 N 1437 «Об утверждении Положения о разработке планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах» [411] используются уровни ПЛАС «А» и «В». Уровень «Б» отражается в проектной документации для объектов I, II и III классов опасности.

Предлагается новая классификация уровней промышленной безопасности производственных процессов с учетом этапов плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (рисунок 5.2).

Уровень 1 показывает функционирование технологического процесса (ТП) в проектном режиме. При появлении возмущающих воздействий система автоматического управления обеспечивает регулирование процесса. В случае превышения диапазона автоматического регулирования следует отображение аварийных сигналов для оператора на уровне 2, и оператор может управлять процессом вручную и перевести его в нормальное состояние на уровне 1. Оператор может задавать новые режимы функционирования ТП. Эти два уровня обеспечивают выпуск качественной продукции [502].

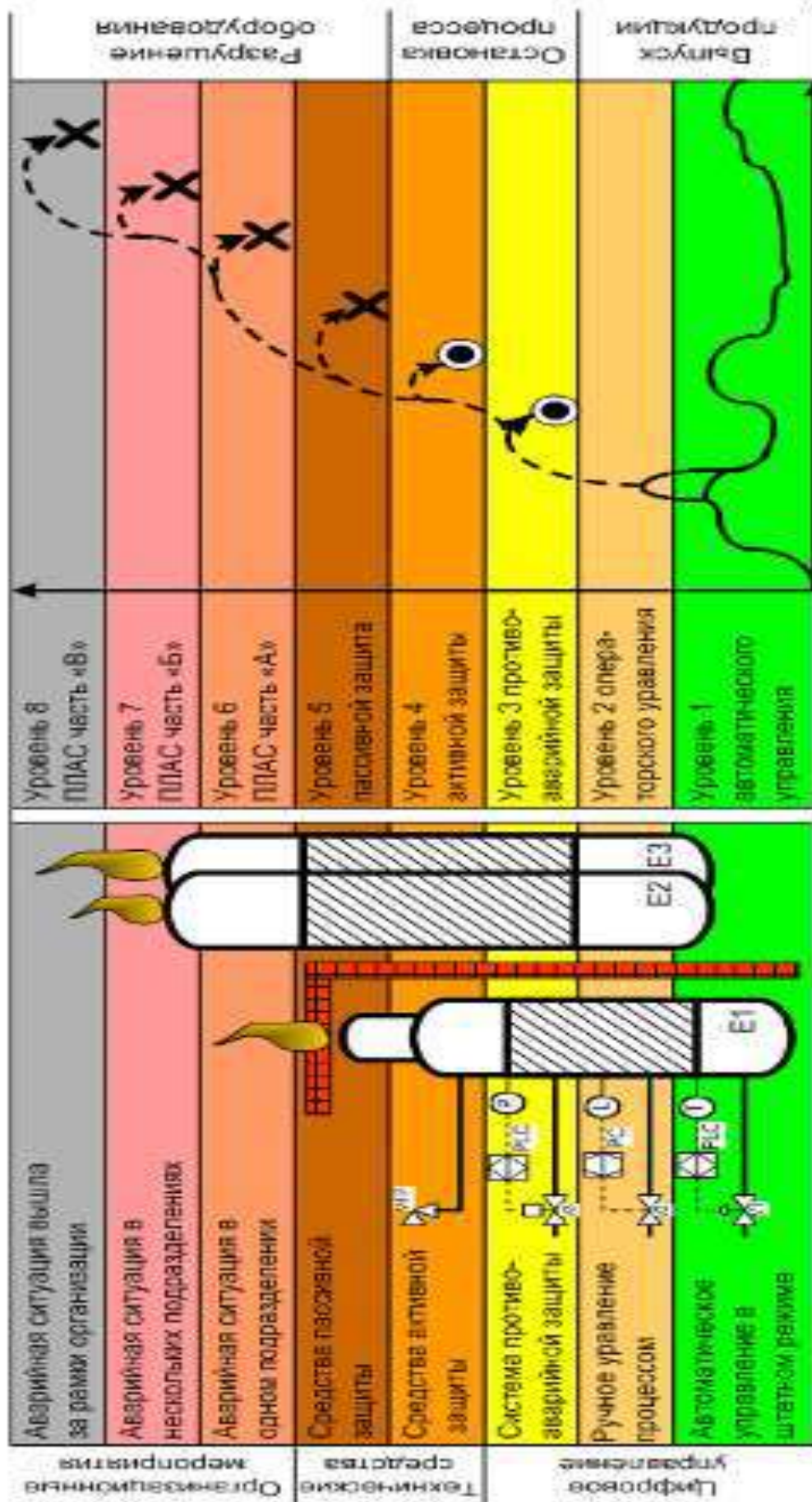


Рисунок 5.2 - Уровни промышленной безопасности

При превышении критических параметров технологического процесса, несмотря на действия оператора, автоматически включается система противоаварийной защиты (уровень 3), которая обеспечивает безопасную остановку процесса. Уровни 1 - 3 реализуются автоматизированными системами на основе аппаратно-программных комплексов.

Уровни защиты технологических процессов 1 - 7 реализуются в рамках предприятия. Уровень 8 относится к компетенции администрации региона, где расположено опасное предприятие. Он включает систему мероприятий по подготовке к защите и по защите населения и материальных ценностей от опасностей чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Уровень 4 обеспечивает активную защиту на основе системы предохранительных клапанов, разрывных дисков и др. На уровнях 3 – 4 происходит прекращение выпуска продукции и переход оборудования в рабочее состояние, которое после проведения обслуживания может быть оперативно введено в эксплуатацию.

Уровень 5 реализуется пассивной защитой на базе дамб нефтяных парков и других защитных систем. Уровень 6 характеризует аварийную ситуацию в пределах одного блока объекта (цеха, установки, производственного участка). Уровень 7 включает систему мероприятий предприятия по подготовке к защите и по защите персонала и материальных ценностей от опасностей чрезвычайных ситуаций техногенного характера. На уровнях 5 – 8 происходит разрушение оборудования.

Для повышения уровня промышленной безопасности необходимо проведения анализа состояний жизненного цикла непрерывных производств. Предложенная классификация уровней промышленной безопасности взаимосвязана с различными этапами жизненного цикла непрерывного производства. Для проведения анализа уровня промышленной безопасности необходимо определить состояния жизненного цикла непрерывного производства. Анализ надежности, стойкости, живучести, безопасности,

технического риска, ожидаемого ущерба и эффективности функционирования жизненного цикла производств может выполняться с применением программного комплекса «Арбитр» [412]. Однако для его использования необходимо определение вероятностей нахождения непрерывного производства в различных состояниях жизненного цикла.

Вероятно-статистический алгоритм анализа жизненного цикла многостадийного производства высококачественного листового:

1. Формализация состояний жизненного цикла производства листового стекла.
2. Моделирование состояний жизненного цикла производства на основе применения аппарата марковской цепи в MathCAD.
3. Применение программного комплекса «Арбитр» для анализа стойкости, живучести, безопасности, технического риска, ожидаемого ущерба и эффективности функционирования жизненного цикла производств.

Формализация состояний жизненного цикла производства листового стекла. Процесс управления жизненным циклом производства включает этапы от его проектирования до полного демонтажа [413]. Анализ ГОСТ Р 56135-2014 «Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения» [414] и ГОСТ Р 57318-2016 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Применение и управление процессами системной инженерии» [415] показывает, что можно определить следующие этапы жизненного цикла производства: 1) проектирование производства для выпуска новой номенклатуры изделий, 2) введение в эксплуатацию производства, 3) штатная эксплуатация, 4) обслуживание производства, 5) модернизация, 6) вывод производства из эксплуатации.

С учетом уровней промышленной безопасности для непрерывного производства предлагается выделить состояния: S_{01} - монтаж заданий и сооружений для ТП, S_{02} - монтаж оборудования ТП, S_{03} - монтаж системы управления ТП, S_{04} - вывод ТП в штатный режим, S_{05} - функционирование ТП в штатном автоматическом режиме, S_{06} - функционирование ТП в штатном

режиме ручного управления, S_{07} - функционирование ТП в режиме противоаварийной защиты, S_{08} - функционирование ТП в режиме активной защиты, S_{09} - функционирование ТП в режиме пассивной защиты, S_{10} - функционирование ТП в режиме аварийной ситуации уровня «А», S_{11} - функционирование ТП в режиме аварийной ситуации уровня «Б», S_{12} - функционирование ТП в режиме аварийной ситуации уровня «В», S_{13} - остановка штатного режима ТП и выпуска качественной продукции, S_{14} - обслуживание, ремонт или демонтаж системы управления ТП, S_{15} - обслуживание, ремонт или демонтаж оборудования ТП, S_{16} - обслуживание, ремонт или демонтаж заданий и сооружений ТП.

Взаимосвязь состояний жизненного цикла производства показана на рисунке 5.3 в виде графа.

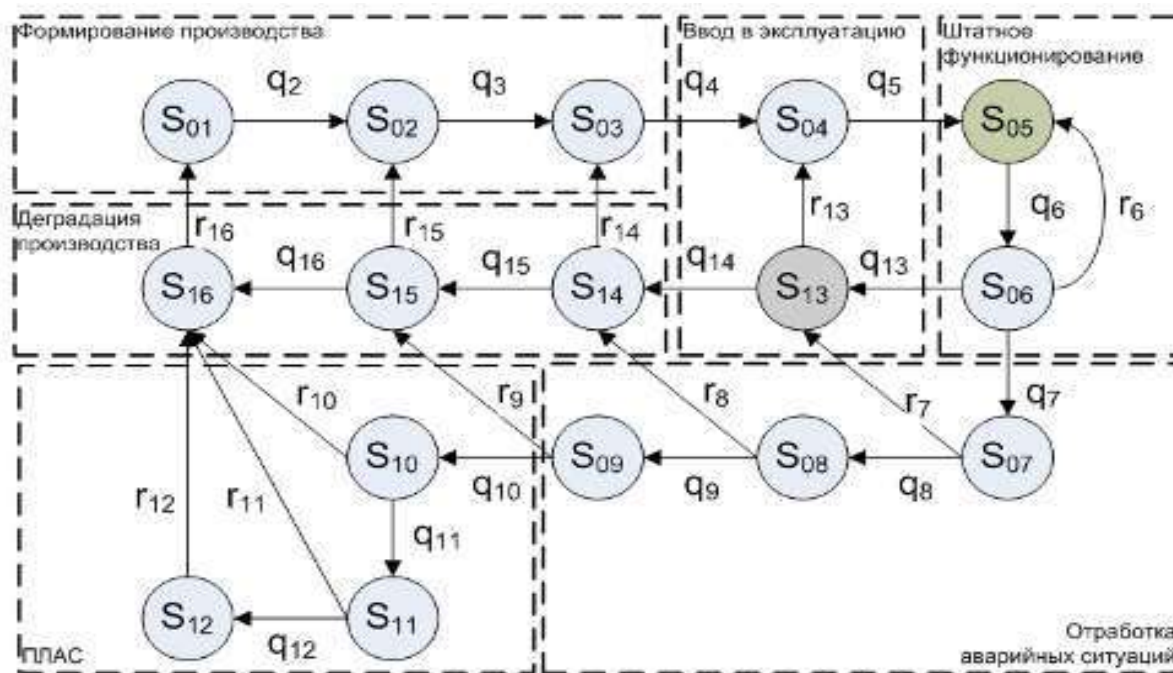


Рисунок 5.3 - Взаимосвязь состояний жизненного цикла производства

Состояния 1-3 относятся к созданию производства и его модернизации, 4 и 13 состояния соответствуют вводу производства в эксплуатацию, 5 и 6 – состояния штатного функционирования производства, с 7 по 12 – состояния аварий на производстве, 13 – состояние остановки производства, с 14 по 17 – состояния демонтажа (утилизации) производства.

Моделирование состояний жизненного цикла производства

Марковскому случайному процессу соответствует функционирование систем, которое характеризуется некоторым конечным набором дискретных состояний $S_1, S_2, \dots, S_n$, смена которых происходит мгновенно в строго определенные заранее известные моменты времени $1, 2, \dots, k, \dots, K$. При исследовании таких систем предполагается, что известны вероятности перехода T_{ij} системы S за один шаг из состояния S_i в состояние S_j , не изменяющиеся от шага к шагу (так как цепь однородная) [416].

В таблице 5.2 приведены вероятности T_{ij} переходов между состояниями жизненного цикла производства, которые получены на основе анализа статистических данных о состояниях жизненного цикла производств листового стекла за период 1997-2021 гг.

Таблица 5.2 - Вероятности T_{ij} переходов между состояниями ЖЦ производства

T_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,3	0,7														
2		0,2	0,8													
3			0,1	0,9												
4				0,1	0,9											
5					0,8	0,2										
6					0,75	0,1	0,05						0,1			
7							0,2	0,05					0,75			
8								0,1	0,05					0,85		
9									0,1	0,05					0,85	
10										0,1	0,05					0,85
11											0,1	0,05				0,85
12												0,1				0,9
13				0,8									0,1	0,1		
14			0,7											0,1	0,2	
15		0,7													0,1	0,2
16	0,8															0,2

В работе [416] проведен анализ аналитического и имитационного моделирования дискретной марковской цепи с применением пакета прикладных программ MathCAD для расчета параметров.

Выполним моделирование жизненного цикла производства на основе применения аппарата марковской цепи (рисунок 5.4).

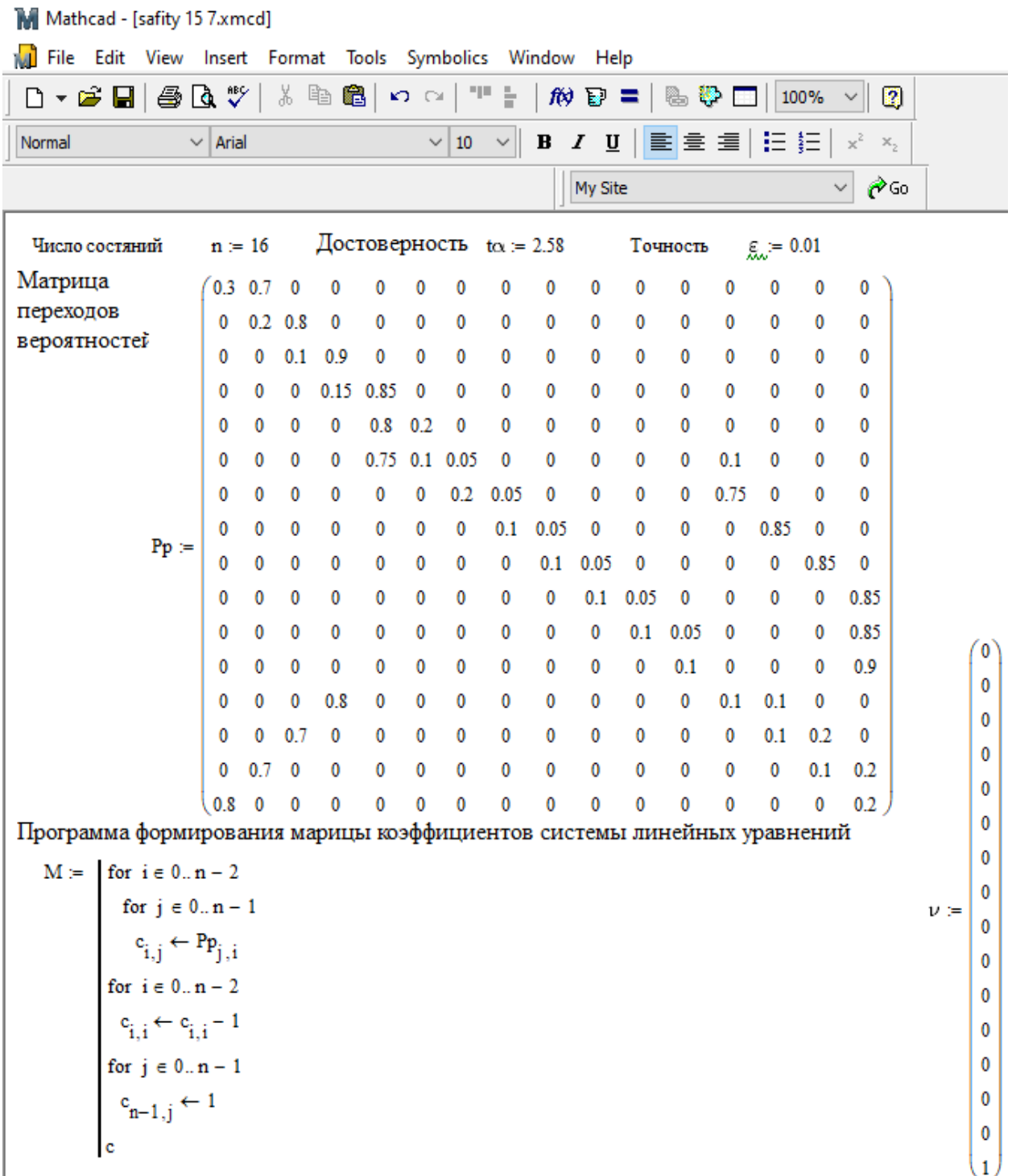


Рисунок 5.4 - Исходные данные моделирования жизненного цикла производства на основе применения аппарата марковской цепи

Выполним моделирование жизненного цикла производства на основе применения аппарата марковской цепи. На основе матрицы вероятностей переходов T строится система линейных уравнений M . Такая система уравнений с нулевыми свободными членами имеет бесконечное множество решений [416]

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n P_i \cdot T_{ij} + P_i \cdot (T_{ij} - 1) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n - 1.$$

Для получения единственного решения заменим последнее уравнение соотношением $M_{ni} = 1$, где $i = 1, \dots, n$.

Для решения систем линейных алгебраических уравнений вида $MP = B$ в Mathcad используется стандартная функция $lsolve(M, B)$, которая возвращает вектор неизвестных P . Результаты аналитического моделирования приведены в таблице 5.3.

Для определения вероятностей состояний жизненного цикла производства в программном комплексе MathCAD выполняется имитация состояний S_i путем последовательной реализации процедуры определения исхода испытаний по жребию в соответствии с заданными значениями переходных вероятностей T (таблица 5.2).

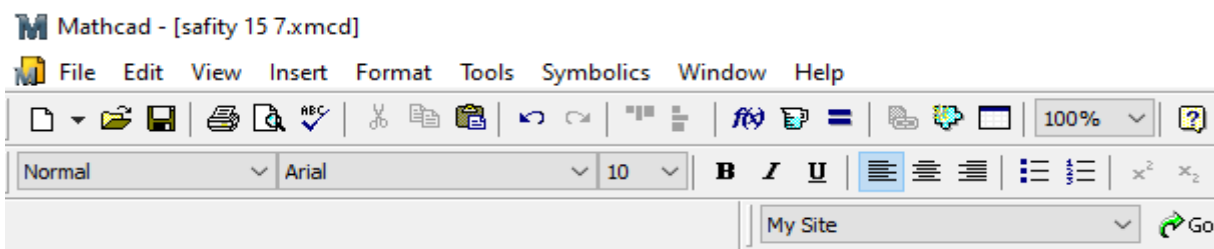
Имитация состояний S_i выполнена путем последовательной реализации процедуры определения исхода испытаний по жребию в соответствии с заданными значениями переходных T_{ij} вероятностей. Имитация следующего за S_m состояния системы производится аналогично. Для этого интервал $[0, 1]$ разбивается на n отрезков, соответствующих значениям переходных вероятностей T_{mi} ($i = 1, 2, \dots, n$) m -й строки матрицы MVI . Граничные значения этих отрезков l_{mk} определяются согласно следующему выражению:

$$l_{mk} = \sum_{i=1}^k T_{mi}.$$

Проведя достаточно большое число испытаний N и подсчитав суммарное число m_i переходов системы в каждое состояние S_i , искомые вероятности можно определить по формуле

$$P_i = \frac{m_i}{N}.$$

Программа моделирования жизненного цикла производства на основе применения аппарата марковской цепи показана на рисунке 5.5.



M =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.7	-0.8	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0.8	-0.9	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0.9	-0.85	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0.85	-0.2	0.75	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0.2	-0.9	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0.05	-0.8	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.05	-0.9	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0.05	-0.9	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	-0.9
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0.1	0.75	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...

P := Isolve(M, v)

P =

	0
0	$2.391 \cdot 10^{-4}$
1	$9.342 \cdot 10^{-4}$
2	$3.624 \cdot 10^{-3}$
3	0.03
4	0.755
5	0.168
6	0.01
7	$5.824 \cdot 10^{-4}$
8	$3.235 \cdot 10^{-5}$
9	$1.797 \cdot 10^{-6}$
10	$9.986 \cdot 10^{-8}$
11	$5.548 \cdot 10^{-9}$
12	0.027
13	$3.591 \cdot 10^{-3}$
14	$8.286 \cdot 10^{-4}$
15	$2.092 \cdot 10^{-4}$

Рисунок 5.5 - Программа моделирования жизненного цикла производства на основе применения аппарата марковской цепи

Результаты имитационного моделирования приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Результаты аналитического и имитационного моделирования

№	Название состояния жизненного цикла	Вероятность при аналитическом моделировании	Вероятность при имитационном моделировании	Разность
1	Монтаж заданий и сооружений для ТП	2.391e-4	2.314e-4	-7.667e-6
2	Монтаж оборудования ТП,	9.342e-4	9.509e-4	1.665e-5
3	Монтаж системы управления ТП	3.624e-3	3.626e-3	2.452e-6
4	Вывод ТП в штатный режим	0.03	0.03	5.738e-5
5	Функционирование ТП в штатном автоматическом режиме	0.755	0.755	-2.651e-4
6	Функционирование ТП в штатном режиме ручного управления	0.168	0.168	1.648e-4
7	Функционирование ТП в режиме противоаварийной защиты	0.01	0.01	1.171e-5
8	Функционирование ТП в режиме активной защиты	5.824e-4	5.879e-4	5.512e-6
9	Функционирование ТП в режиме пассивной защиты	3.235e-5	3.08e-5	-1.555e-6
10	Функционирование ТП в штатном автоматическом режиме аварийной ситуации уровня «А»	1.797e-6	2.1e-6	3.025e-7
11	Функционирование ТП в штатном автоматическом режиме аварийной ситуации уровня «Б»	9.986e-8	3,00e-7	2.001e-7
12	Функционирование ТП в штатном автоматическом режиме аварийной ситуации уровня «В»	5.548e-9	0	-5.548e-9
13	Остановка штатного режима ТП и выпуска качественной продукции	0.027	0.027	2.573e-7
14	Обслуживание, ремонт или демонтаж системы управления ТП	3.591e-3	3.601e-3	9.706e-6
15	Обслуживание, ремонт или демонтаж оборудования ТП	8.286e-4	8.437e-4	1.506e-5
16	Обслуживание, ремонт или демонтаж заданий и сооружений ТП	2.092e-4	1.995e-4	-9.683e-6

Значения вероятностей состояний жизненного цикла, полученные в результате имитационного моделирования и методом аналитического расчета, с точностью до четвертого знака после запятой не отличаются.

На основе предложенной новой классификации уровней промышленной безопасности производственных процессов с учетом этапов плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций определены состояния

жизненного цикла непрерывного производства. Разработана математическая модель состояний жизненного цикла непрерывного производства и определены их взаимосвязи. На основе анализа статистических данных о состояниях жизненного цикла производств листового стекла определены вероятности переходов между состояниями жизненного цикла производства. В программном комплексе MathCAD выполнен расчет вероятностей для каждого состояния жизненного цикла производства листового стекла аналитическим методом и методом имитационного моделирования. Получение расчетных вероятностей позволяет в дальнейшем использовать программный комплекс «Арбитр» для анализа стойкости, живучести, безопасности, технического риска, ожидаемого ущерба и эффективности функционирования жизненного цикла производств [417].

5.3. Логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей надежности производства высококачественного листового стекла

Интенсификация и связанное с ней постоянное усложнение технических и организационных систем повышает их уязвимость по отношению ко все большему количеству факторов. Поэтому анализу безопасности сложных систем уделяется пристальное внимание [418]. Одним из наиболее эффективных методов такого анализа является общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ), который является дальнейшим развитием классических монотонных логико-вероятностных методов. ОЛВМ реализован в программном комплексе «Арбитр» компании «Севзапмонтажавтоматика» [419, 420]. Он обеспечивает оценку технического риска, выработку и обоснование исследовательских, проектных, эксплуатационных, управленческих решений по обеспечению надежности, живучести и безопасности исследуемых системных объектов и процессов [421].

Логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла включает следующие этапы:

1. Анализ технологических процессов и оборудования, реализующего функционирование этих ТП.
2. Разработка графа взаимосвязей технологических процессов и оборудования.
3. Определение интенсивностей отказов технологического оборудования в течение года.
4. Расчет, на основе определённых интенсивностей отказов технологического оборудования, вероятности безотказного функционирования элементов производства в течение года без учета восстановления.
5. Разработка в программном комплексе «Арбитр» схемы функциональной целостности на основе графа взаимосвязей технологических процессов и оборудования.
6. Ввод исходных данных о вероятности безотказного функционирования элементов производства в течение года без учета восстановления в программный комплекс «Арбитр».
7. Расчет вероятности реализации принятого критерия безотказной работы производства в течении года.
8. Расчет значений положительного вклада элементов в обеспечение реализации критерия безотказной работы производства в течении года.
9. Анализ диаграммы положительных вкладов элементов и определение наибольших значений этих коэффициентов, оказывающих наибольшее влияние на надежность системы в целом.
10. Разработка мероприятий по повышению вероятности безотказной работы отобранных элементов СФЦ с учетом технико-экономических возможностей их реализации.

Разработана схема функциональной целостности (СФЦ) (рисунок 5.6) технологических процессов производства листового стекла флоат-способом, которое состоит из следующих технологических процессов: приготовление стекольной шихты; стекловарение; формование ленты стекла на поверхности

расплава олова; отжиг ленты стекла; контроль качества, резка ленты стекла на листы заданного размера; упаковка листов стекла [422].

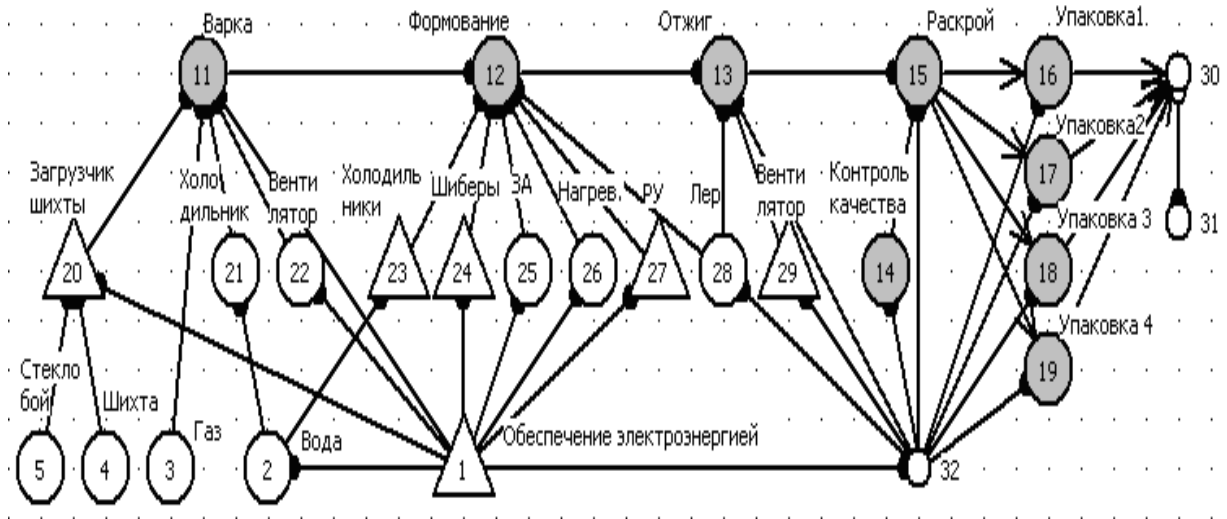


Рисунок 5.6. Схема функциональной целостности производства ВЛС

Окружностями с номером внутри обозначены элементы производства листового стекла. Элементы с номерами 30, 31, 32 являются фиктивными и используются для улучшения визуализации СФЦ. Элементы 1, 20, 23, 24, 27, 29 в виде треугольников, являются эквивалентными и имеют внутреннюю структуру (рисунок 5.7), обеспечивающую резервирование.

Для расчета надежности функционирования производства листового стекла по логическому критерию «изготовление качественного стекла» используется функция y_{30} (элемент №30 на рисунке 5.6)

$y_{30} =$

$$\begin{aligned}
 &= x_1 x_2 x_3 x_{27} x_{25} x_{22} x_4 x_5 x_{11} x_{12} x_{13} x_{15} x_{14} x_{29} x_{26} x_{23} x_{28} x_{21} x_{20} x_{24} x_{19} \\
 &+ x_1 x_2 x_3 x_{27} x_{25} x_{22} x_4 x_5 x_{11} x_{12} x_{13} x_{15} x_{14} x_{29} x_{26} x_{23} x_{28} x_{21} x_{20} x_{24} x_{18} \\
 &+ x_1 x_2 x_3 x_{27} x_{25} x_{22} x_4 x_5 x_{11} x_{12} x_{13} x_{15} x_{14} x_{17} x_{29} x_{26} x_{23} x_{28} x_{21} x_{20} x_{24} \\
 &+ x_1 x_2 x_3 x_{27} x_{25} x_{22} x_4 x_5 x_{11} x_{12} x_{13} x_{15} x_{14} x_{16} x_{29} x_{26} x_{23} x_{28} x_{21} x_{20} x_{24}
 \end{aligned}$$

Логическая функция y_{30} содержит 24 элемента и 4 конъюнкции.

Исходными данными для проведения анализа выступают вероятности безотказного функционирования элементов производства в течение года без учета восстановления (таблица 5.4). Для их определения использованы интенсивности отказов технологического оборудования в течение года. Для данной структуры СФЦ и исходных данных вероятность реализации

принятого критерия составляет 0,614899, что соответствует интенсивности 0,4863 отказов в год.

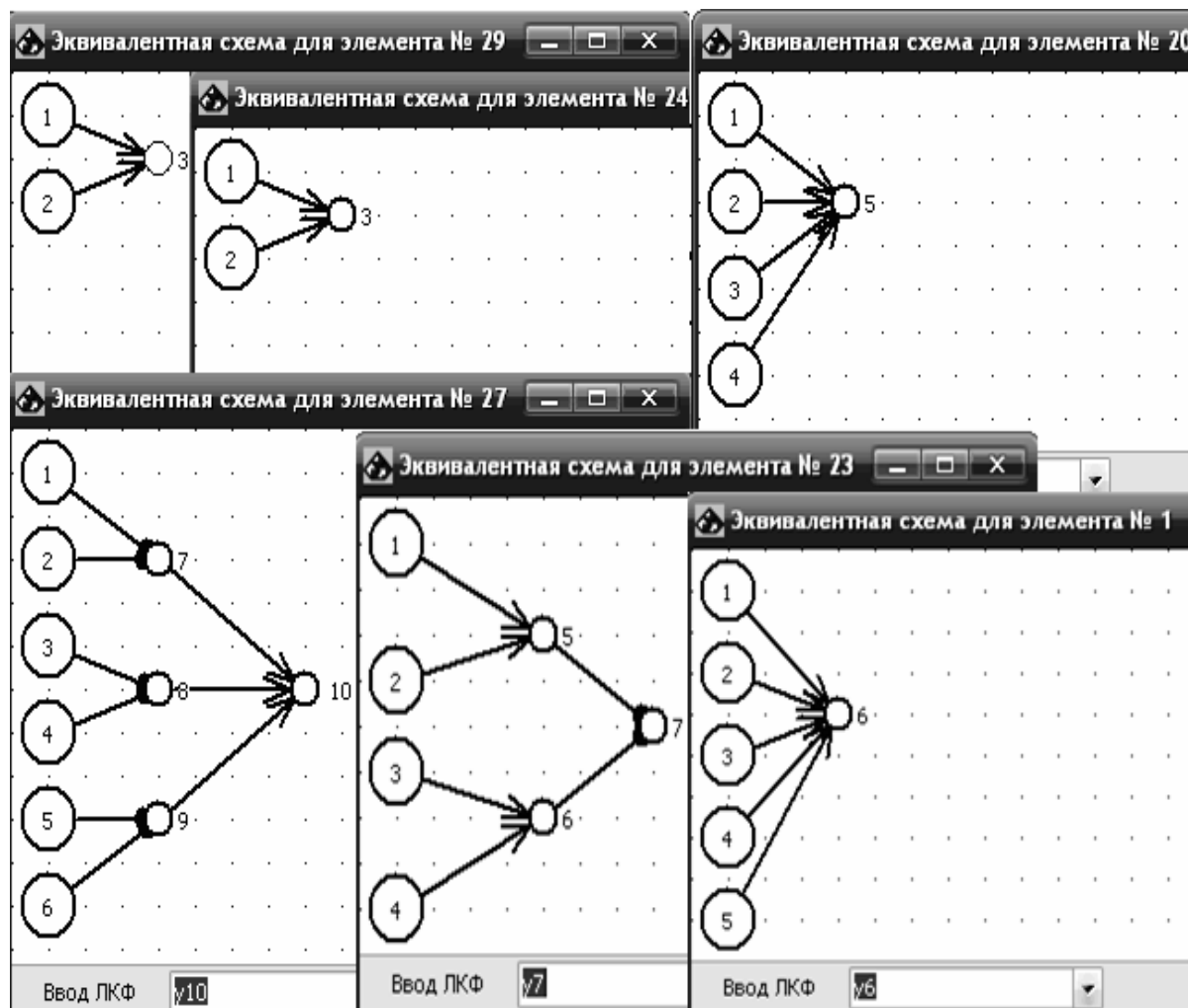


Рисунок 5.7 - СФЦ эквивалентных элементов 1, 20, 23, 24, 27 и 29

В таблице также приведены значения положительного вклада элементов в обеспечение реализации критерия. Под положительной значимостью элемента понимается коэффициент влияния его надежности на надежность системы в целом.

Положительный вклад предоставляет пользователю объективную количественную оценку мероприятий по изменению параметров отдельных элементов на реальную надежность и/или безопасность исследуемой системы в целом. Результат моделирования показывает положительные вклады элементов в вероятность реализации критерия (рисунок 5.8).

Таблица 5.4 - Характеристики элементов системы

№	Наименование элемента	Вероятность безотказной работы за год	Интенсивности отказов в год	Положительный вклад
1	Обеспечение электричеством	0,9999	1,000E-04	1,832E-07
2	Обеспечение водой	0,99	1,005E-02	0,0061665
3	Обеспечение газом	0,98	2,020E-02	0,012459
4	Обеспечение шихтой	0,99	1,005E-02	0,0061665
5	Обеспечение стеклобоем	0,98	2,020E-02	0,012459
11	Варочная печь	0,96	4,082E-02	0,025437
12	Ванна расплава	0,95	5,129E-02	0,032131
13	Печь отжига	0,97	3,046E-02	0,018881
14	Контроль качества	0,99	1,005E-02	0,0061665
15	Участок раскроя	0,95	5,129E-02	0,032131
16	Линия упаковки 1	0,94	6,187E-02	5,494E-06
17	Линия упаковки 2	0,94	6,187E-02	5,494E-06
18	Линия упаковки 3	0,95	5,129E-02	5,494E-06
19	Линия упаковки 4	0,95	5,129E-02	5,494E-06
20	Загрузчик шихты	0,9999	1,000E-04	6,105E-05
21	Холодильник пережима	0,999	1,001E-03	0,0006111
22	Вентилятор студки	0,95	5,129E-02	0,032131
23	Холодильники ванны расплава	0,9998	2,000E-04	0,0001221
24	Шиберы узла слива	0,9996	4,000E-04	0,0002443
25	Обеспечение защитной атмосферой	0,96	4,082E-02	0,025437
26	Электронагреватели	0,97	3,046E-02	0,018881
27	Растягивающие устройства	0,99907	9,300E-04	0,0005663
28	Транспортер ленты стекла (лер)	0,93	7,257E-02	0,045951
29	Вентиляторы печи отжига	0,95	5,129E-02	0,032131

Анализ диаграммы положительных вкладов элементов показывает, что наиболее «узкими» местами системы являются элементы: 12 «Ванна расплава», 15 «Участок раскроя», 22 «Вентилятор студки», 28 «Транспортер ленты стекла». При повышении вероятности надежности функционирования этих элементов резервированием или изменением их конструкции до 0,9999 вероятность реализации критерия возрастет на 0,15 (24%). В случае незапланированной остановки процесса выработки листового стекла убытки составляют более 100 тыс. руб. в час.

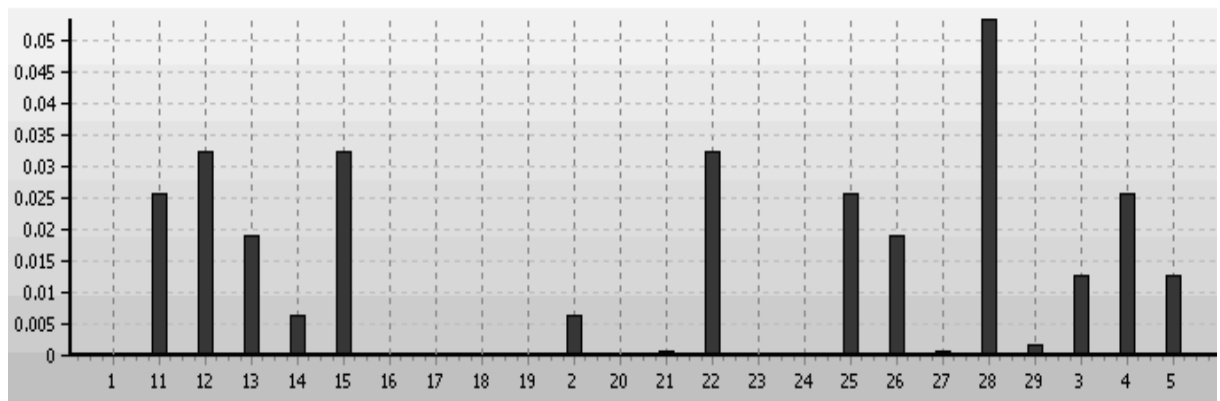


Рисунок 5.8 - Диаграмма положительных вкладов элементов

Предложенный подход позволяет на стадиях проектирования и модернизации определять и обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства листового стекла. Применение данного подхода позволяет получить исходные данные для оценки технических рисков промышленных предприятий. Дополнительными критериями для определения первоочередных мероприятий по повышению надежности функционирования производства листового стекла являются: время выполнения; время простоя производства; изменение производительности после реализации мероприятий; изменение эксплуатационных расходов; сокращение убытков от простоя производства, связанных с отказом оборудования; повышение качества выпускаемой продукции; снижение технического риска по надежности [422].

5.4. Алгоритм планирования выпуска партий многоассортиментного высококачественного листового стекла

В настоящее время для производителей высококачественного листового стекла (ВЛС) становится актуальной задача энергоресурсоэффективного управления режимами производственных линий в условиях необходимости оперативного удовлетворения изменяющихся требований потребителей [3, 424]. Поэтому необходима разработка систем поддержки принятия решений (СППР) на основе компьютерных имитационных моделей предприятий, эксперименты с которыми позволяют определить лучшие значения характеристик производственного процесса при различных сценарных условиях, например, при резком изменении спроса на конечную продукцию или при возникновении перебоев в поставках сырья и комплектующих [73, 85, 425].

Принятие обоснованных решений по управлению производственными, организационными и вспомогательными процессами предприятия основано на анализе результатов компьютерного моделирования функционирования этих процессов с использованием инструментов «Индустрии 4.0».

В результате компьютерного моделирования оптимизируются значения основных характеристик процессов производства, что приводит к снижению производственных запасов, себестоимости, времени производственного цикла, энергоресурсозатрат на производство единицы продукции, к обеспечению требуемого уровня качества и своевременности поставок готовой продукции [426 – 428].

При имитационном моделировании [429 – 431] производственных характеристик предприятий применяются методы дискретно-событийного моделирования [432, 433], системной динамики [434 – 436], агентного моделирования [437 – 440], расширенные сети Петри [441] и др.

Интеграция имитационных моделей технологических и производственных процессов с оптимизационными модулями систем

моделирования с базами данных SCADA и ERP-систем предприятия является основой создания «цифровых двойников производства» [442, 443].

Среда имитационного моделирования AnyLogic [440] на основе базовых типов моделей «системная динамика», «дискретно-событийный» и «агент» позволяет строить иерархические модели сложных систем. Модель системной динамики функционирования многостадийного производства ВЛС в среде AnyLogic обеспечивает возможность оптимизации расходов на проведение мероприятий и определения значений параметров модели для минимизации или максимизации значения целевого функционала.

Встроенный в AnyLogic оптимизатор OptQuest позволяет решать задачи многокритериальной оптимизации при заданных ограничениях. Так как оптимизация стохастических моделей связана с варьированием значений величин, для каждой итерации процесса применяется заранее заданное число репликаций (экспериментов) или «прогонов», по результатам которых формулируются результаты итерации [444].

Производство ВЛС как объект управления характеризуется большими постоянными затратами на электроэнергию, природный газ и сырье, а также сезонным спросом на строительное стекло. Необходимость удовлетворения запросов потребителей на ВЛС различных типов (толщина, цвет, размер) требует изменять технологические режимы производства ВЛС.

Периоды изменения режимов производства ВЛС относятся к категории планового простоя оборудования, что увеличивает себестоимость продукции и снижает энергоресурсоэффективность производства. Решением этой проблемы является увеличение количества производственных линий для обеспечения возможности их специализации на производстве ВЛС постоянной толщины и размера, а также создание больших складских площадей для обеспечения хранения полугодовых складских запасов каждого типа продукции ВЛС. При отсутствии таких возможностей предприятиям необходимо решать задачи оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС.

Разработка алгоритма планирования производства обеспечит оптимизацию размера партий выпуска ВЛС различных типов и сокращение количества изменений технологических режимов производства ВЛС, что позволит повысить энергоресурсоэффективность производства. Алгоритм планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС состоит из следующих этапов.

Этап 1. Анализ исходных данных на основе разведочного анализа характеристик производства ВЛС и кластерного анализа номенклатуры производимого ВЛС.

Этап 2. Разработка стратегической карты целей и показателей функционирования многостадийного производства ВЛС для определения объектов типа «Накопитель» [440] в системно-динамической модели (СДМ) [445, 446].

Этап 3. Описание функционирования многостадийного производства ВЛС системой дифференциальных уравнений, определяющих скорость изменения объектов типа «Накопитель» на основе значений динамических переменных функций потоков СДМ.

Этап 4. Разработка СДМ на основе системы дифференциальных уравнений функционирования многостадийного производства ВЛС [447, 486].

Этап 5. Разработка модели состояний агента «Производство» (МСА) для переключения режимов производства в СДМ [448].

Этап 6. Разработка дискретно-событийной многоагентной модели (ДСММ) формирования пакетов заказов на ВЛС разных типов для СДМ производства ВЛС [449].

Этап 7. Апробация комплексной компьютерной имитационной модели на статистических данных производств ВЛС. При необходимости корректировки модели выполняется переход на «Этап 1».

Этап 8. Выполнение численных экспериментов с комплексной компьютерной имитационной моделью при различных сценарных условиях для оптимизации значений объемов заказов каждого типа ВЛС в месячных и

годовых планах производства, а также количества изменений режимов производства ВЛС, влияющих на энергоресурсоэффективностью многостадийного производства.

Этап 9. Принятие решений по управлению энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС на основе анализа результатов «Этапа 8». Переход на «Этап 7».

Схема алгоритма моделирования планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС представлена на рисунке 5.9.

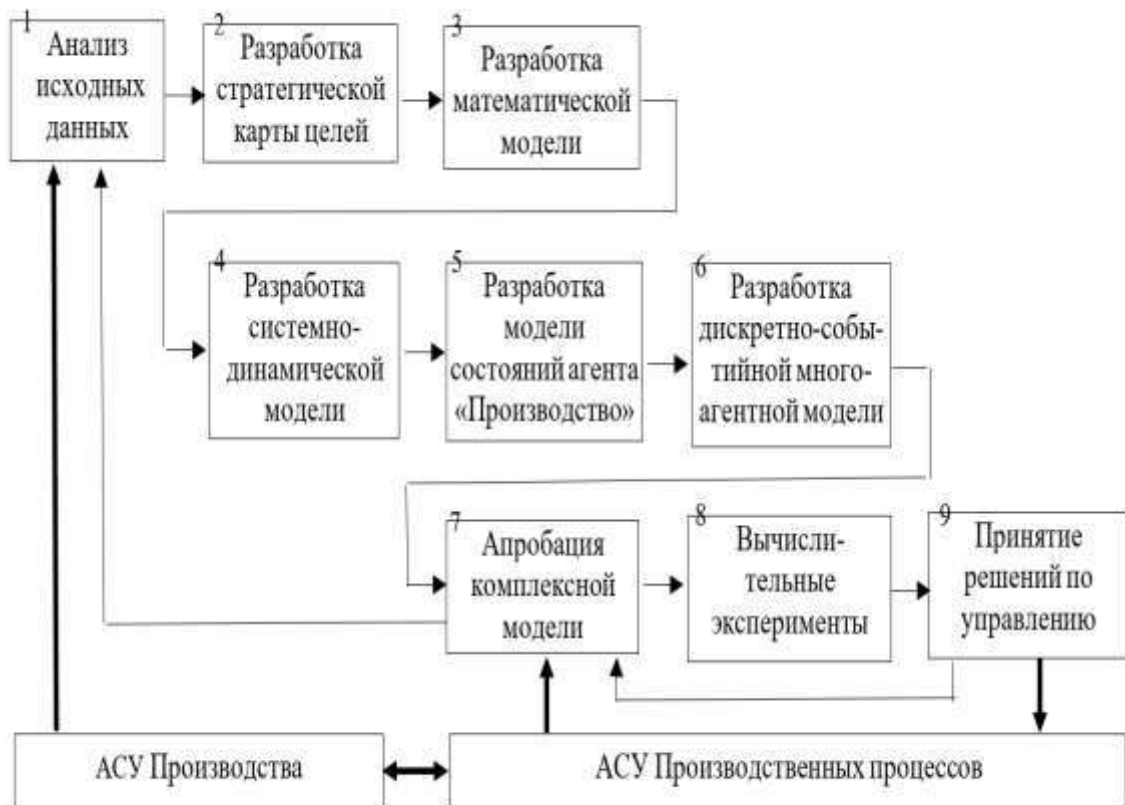


Рисунок 5.9 - Схема алгоритма планирования выпуска партий ВЛС

Пример реализации предложенного алгоритма моделирования для оптимизации планирования выпуска партий многоассортиментного ВЛС приведен в разделе 7.1 [491].

5.5. Имитационное моделирование организационно-технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла

Для обеспечения постоянства режимов стекловарения и объёма съёма стекла при производстве листового стекла толщиной 3 мм и менее возрастает скорость вытягивания ленты стекла и поступления листов на участок съёма [450]. При малом количестве брака станции съёма начинают не успевать обрабатывать поступающие листы. Для обеспечения функционирования всего участка съёма стекла приходится часть качественных листов направлять на станцию утилизации брака стекла. Поэтому оптимизация управления станциями съёма тонкого стекла повышает эффективность производства листового стекла в целом.

Станции съёма ВЛС представляют собой специализированные роботизированные технологические комплексы (РТК), состоящие из: специализированного или универсального робота, системы пневматического захвата листа стекла, системы управления, поворотного стола с пирамидой для листового стекла и другого оборудования. Для решения задачи оптимизации структур станций съёма ВЛС и состава оборудования предлагается использовать алгоритм интерактивной многокритериальной оптимизации [451] с учетом особенностей оборудования и режимов технологического процесса съёма листового стекла. Алгоритм обеспечивает построение субоптимальных структур РТК и включает следующие этапы.

Этап 1. Анализ номенклатуры, параметров листов стекла и технологий их упаковки с целью выбора допустимого варианта базовой компоновки структуры РТК $S_i \in S$.

Этап 2. Определение типа и вида базовых модулей M_{ju} , используемых для построения выбранной структуры РТК S_i .

Этап 3. Формирование совокупности критериев оптимизации K и ограничений O , в наибольшей степени характеризующих соответствие структуры РТК его целевому назначению.

Этап 4. Поиск в диалоговом режиме с ЭВМ по заданным критериям K и

ограничениям O множества квазиоптимальных структур РТК S_{it}' .

Этап 5. Построение имитационной модели и исследование на ней процесса функционирования РТК со структурами S_{it}' .

Этап 6. Выбор ЛПР по результатам моделирования оптимальной структуры РТК $S_{onm} \in S_{it}'$.

Для анализа функционирования конвейерных систем участка упаковки высококачественного листового стекла, состоящего из специализированного оборудования, предлагается использовать общие постановки задач, предложенные в работах [452, 453].

Для анализа функционирования РТК – станций съёма листового стекла на этапе 5 предложено использовать методы имитационного моделирования, реализованные в среде моделирования AnyLogic. В основе построения моделей AnyLogic положен объектно-ориентированный принцип, благодаря чему существенно облегчается создание модели, ее изменение, анализ результатов численных экспериментов и выполнение оптимизации параметров имитационной модели [455].

Алгоритм моделирования организационно-технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла

1. Анализ функционирования оборудования технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла.
2. Разработка графа взаимосвязей технологического оборудования.
3. Определение интенсивностей поступления стекла различной толщины.
4. Разработка в программном комплексе многоагентной дискретно-событийной модели технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла.
5. Ввод исходных данных о интенсивности поступления стекла различной толщины в программный комплекс.

6. Выполнение численных экспериментов многоагентной дискретно-событийной модели технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла.

7. Анализ результатов загрузки оборудования технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла и определение наиболее загруженного оборудования.

8. Проведение оптимизационных экспериментов для поиска значений параметров технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла, обеспечивающих выравнивание загрузки технологического оборудования этого процесса.

9. Передача в АСУ ТП упаковки высококачественного листового стекла параметров, обеспечивающих выравнивание загрузки технологического оборудования.

Источниками получения информации для построения модели являются: базы данных SCADA-систем, документы (научная, техническая, технологическая документация), управленческо-административный и производственный персонал (беседы), непосредственные наблюдения за процессом функционирования реально существующих объектов и т.д. В случае вновь создаваемых объектов используется накопленный опыт и результаты наблюдения за процессами функционирования аналогичных систем с учетом особенностей проектируемого объекта.

В отрасли производства строительных материалов изготовление листового стекла является одним из наиболее энергоемких. Существенное влияние на эффективность его производства оказывает технологический процесс раскроя ленты стекла на листы, их съёма и упаковки. Этот технологический процесс основан на применении механического оборудования, производительность которого ограничена. Поэтому на стекольных предприятиях устанавливают несколько станций резки, съёма и упаковки листового стекла. На рисунке 5.10 показана схема участка съёма листового стекла.

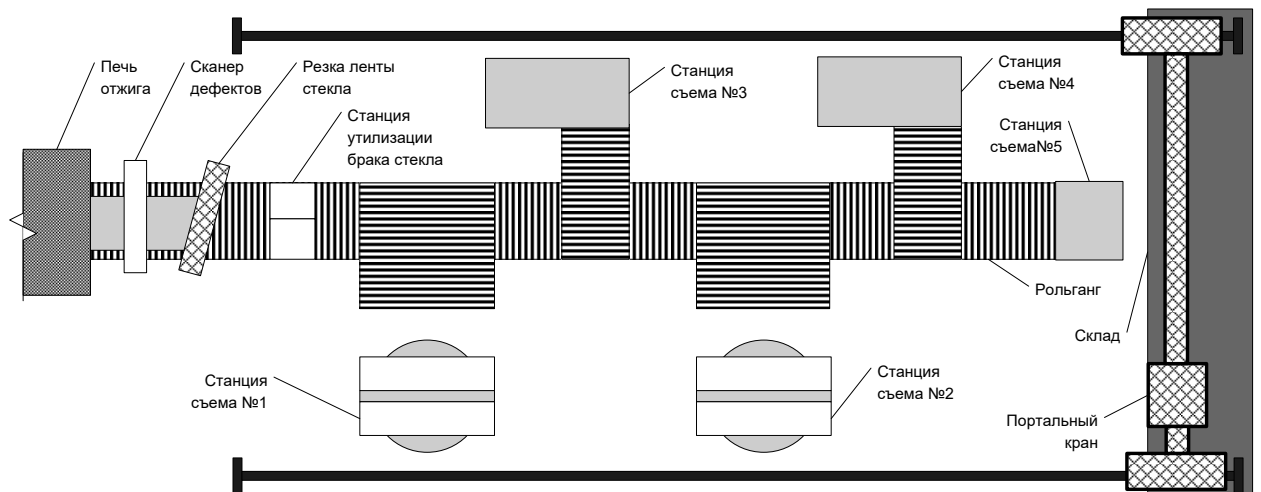


Рисунок 5.10 - Схема участка съема листового стекла

Для обеспечения постоянства режимов стекловарения и объёма съёма стекла при производстве листового стекла толщиной 3 мм и менее возрастает скорость вытягивания ленты стекла и поступления листов на участок съёма. При малом количестве брака станции съёма начинают не успевать обрабатывать поступающие листы. Для обеспечения функционирования всего участка съёма стекла приходится часть качественных листов направлять на станцию утилизации брака стекла. Поэтому оптимизация управления станциями съёма тонкого стекла повышает эффективность производства листового стекла в целом [450].

Для анализа функционирования станций съёма листового стекла применим метод имитационного моделирования, реализованный в программной среде Tecnomatix Plant Simulation, разработанной компанией Siemens. В его основу положен объектно-ориентированный принцип построения модели, благодаря чему существенно облегчается создание модели, ее изменение, анализ и оптимизация.

Источниками получения информации для построения модели являются: документы (научная, техническая, технологическая документация), управленческо-административный и производственный персонал (беседы), непосредственные наблюдения за процессом функционирования реально существующих объектов и т.д. В случае вновь создаваемых объектов используется накопленный опыт и результаты наблюдения над процессами

функционирования аналогичных систем с учетом особенностей проектируемого объекта.

Для моделирования участка съема листового стекла на основе априорной информации о продукции и технологических операциях задаются следующие параметры: n - количество узлов сети (рабочих позиций); $\lambda_{\text{вх } \ell}, k_{\ell}$ - соответственно, интенсивности и порядки входных потоков листов стекла, $\ell = \overline{1, L}$ (L - количество входных потоков сети); p_r - вероятности появления во входном потоке листов r - го типа (при обработке листов разного типа), $r = \overline{1, R}$ (R - количество типоразмеров листов); m_i и D_i - среднее время и дисперсия времени обработки листа в i - м узле сети, $i = \overline{1, n}$; $P = (p_{ij})$ - вероятностная матрица распределения потока листов между узлами сети; p_{ij} - доля потока листов, передаваемых от i - го узла к j - му узлу ($i, j = \overline{1, n}$) [450].

Входной поток сети аппроксимируется, потоком Эрланга соответствующей интенсивности и порядка, а время обработки листов стекла на рабочих позициях - нормальными законами распределения с заданными параметрами. Входным потоком на участке съема листового стекла является модуль резки ленты стекла. Модуль резки стекла раскраивает ленту стекла с учетом задания и уменьшения площади и количества бракованных листов. В таблице 5.5 представлены типы заявок (брак, большие стекла (джамбо), средние, малые) и время их обработки на каждой позиции.

В качестве показателей эффективности функционирования участка съёма листового стекла используются: средняя длительность производственного цикла обработки листов стекла каждого типа; коэффициенты загрузки рабочих позиций в ходе реализации ТП; среднее количество листов в накопителях [450].

Исходные данные для моделирования показаны в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Объекты моделирования

№	Технологический объект	Объект модели	Свойства модели	
			Типы заявок	Время, с
1	Модуль резки и разлома ленты стекла	Источник заявок	брак, большие, средние, малые стекла	0
2	Рольганг	Линия задержки	Задержка	5
3	Станция утилизации брака	Обработка	Брак	10
4	Рольганг	Линия задержки	Задержка	6
5	Рольганг к станции №1	Линия задержки	Задержка	8
6	Станция съема №1	Обработка	Большие стекла	30
7	Рольганг	Линия задержки	Задержка	4
8	Рольганг к станции №3	Линия задержки	Задержка	6
9	Станция съема №3	Обработка	Средние и малые стекла	10
10	Рольганг	Линия задержки	Задержка	5
11	Рольганг к станции №2	Линия задержки	Задержка	8
12	Станция съема №2	Обработка	Большие стекла	30
13	Рольганг	Линия задержки	Задержка	4
14	Рольганг к станции №4	Линия задержки	Задержка	6
15	Станция съема №4	Обработка	Средние и малые стекла	10
16	Рольганг	Линия задержки	Задержка	5
17	Станция съема №5	Обработка	Малые стекла	12
18	Портальный кран	Обработка	Ящики для склада	600
19	Склад	Сток заявок	Ящики	0

Анализ результатов моделирования функционирования участка съема листового стекла показывает, что наиболее загруженными являются рабочие позиции 6 и 12. Их коэффициенты загрузки составляют соответственно 0,83 и 0,81. Позиции 9, 15, 17 загружены лишь на 0,35 - 0,55. Однако, исключить из структуры РТК одну из рабочих позиций 9 или 15 не представляется возможным, так как коэффициент загрузки оставшейся позиции при этом составит значение большее 1 [450].

На рисунке 5.11. приведена блок-схема имитационной модели участка съема стекла в программной среде Tecnomatix Plant Simulation 10.1

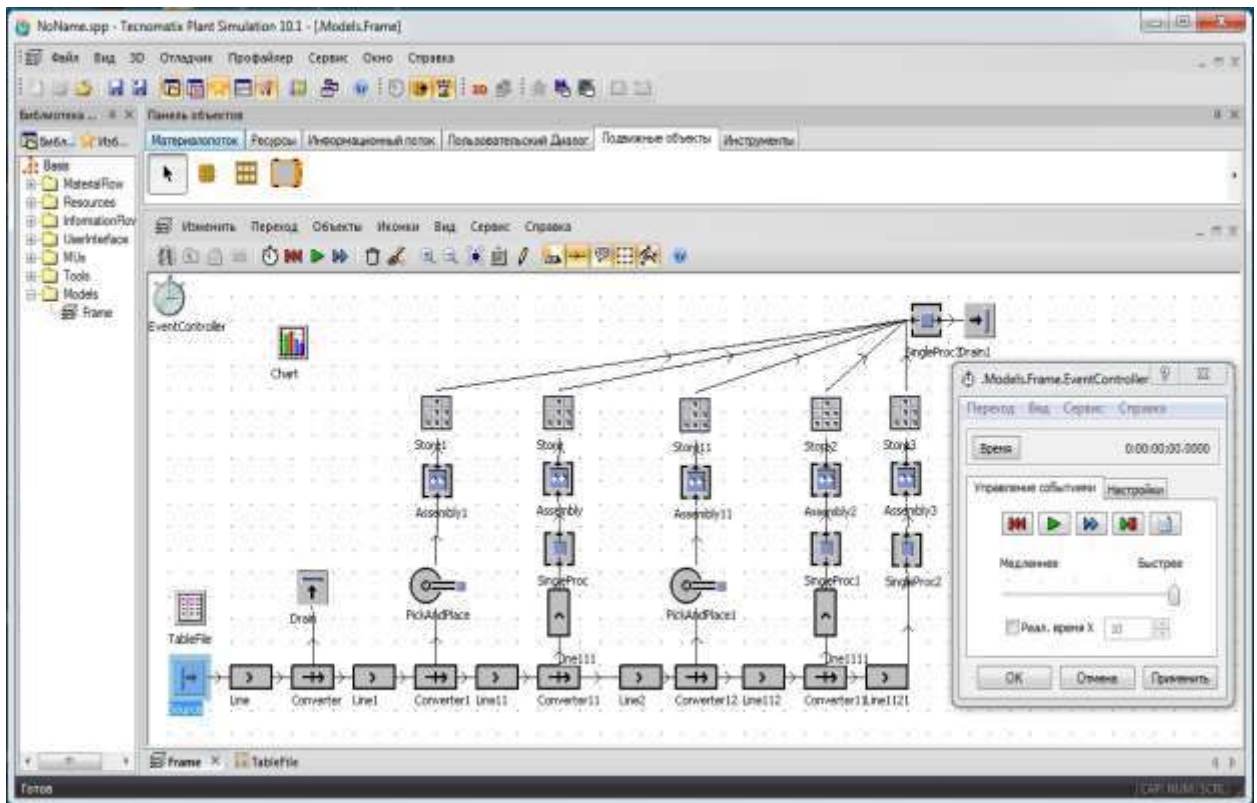


Рисунок 5.11 - Блок-схема имитационной модели участка съема стекла

Результаты имитационного моделирования являются основой для разработки более эффективных по критерию производительности циклограмм и программ для промышленных контроллеров, обеспечивающих управление оборудованием участка съема листового стекла [456].

5.6. Выводы

Раздел 5.1. Для исследования влияния на себестоимость производства высококачественного листового стекла таких параметров, как: качество сырья, состояние основного технологического оборудования, размеры складов для стекла стандартных размеров и «Джамбо», выполнен системный анализ. Его результаты позволили разработать стратегическую карту целей и показателей функционирования производства высококачественного листового стекла. Стратегическая карта целей с использованием математической модели функционирования производства высококачественного листового стекла позволяет выполнить анализ взаимосвязей показателей и определить допустимые значения нормальных и аварийных границ каждого из них.

Результаты моделирования обеспечивают решение задач многоуровневого оптимального управления энергоресурсоэффективностью и поддержку управленческих решений автоматизированного управления производством высококачественного листового стекла.

Раздел 5.2. Предложена новая классификация уровней промышленной безопасности производственных процессов с учетом этапов плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций. Определены состояния жизненного цикла непрерывного производства с учетом предложенной классификации. Разработана математическая модель состояний жизненного цикла непрерывного производства и определены их взаимосвязи. На основе анализа статистических данных о состояниях жизненного цикла производств листового стекла определены вероятности переходов между состояниями жизненного цикла производства. В результате статистического анализа вероятностей переходов состояний для производства листового стекла оказалось возможным применение аппарата марковских процессов для оценки вероятности нахождения его в этих состояниях. В программном комплексе MathCAD выполнен расчет вероятностей для каждого состояния жизненного цикла производства листового стекла. Для определения вероятностей состояний жизненного цикла в программном комплексе MathCAD выполнено имитационное моделирование. Проведено сравнение результатов расчета вероятностей состояний жизненного цикла производства, полученных методом имитационного моделирования и методом аналитического расчета.

Раздел 5.3. Рассмотрен логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла и анализа относительных затрат на резервирование элементов и показателей надежности производства листового стекла с использованием логико-вероятностного метода и программного комплекса «АРБИТР». Разработана схема функциональной целостности производства листового стекла. Результаты использования алгоритма позволяет выявить наиболее вероятные последовательности отказов,

элементы, ограничивающие надежность АСУТП, а также своевременно разработать и реализовать мероприятия для выравнивания надежности участков производства. Предложенный алгоритм позволяет на стадиях проектирования и модернизации определять и обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства листового стекла.

Раздел 5.4. Выполнен анализ современных методов имитационного моделирования сложных организационно-технических систем. Разработан алгоритм планирования производства, который обеспечивает оптимизацию размера партий выпуска ВЛС различных типов и сокращение количества изменений технологических режимов производства ВЛС, что позволяет повысить энергоресурсоэффективность производства.

Раздел 5.5. Предложен алгоритм интерактивной многокритериальной оптимизации состава оборудования и структур РТК упаковки высококачественного листового стекла с учетом особенностей режимов технологического процесса. Разработан алгоритм моделирования организационно-технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла. Разработана многоагентная дискретно-событийная имитационная модель функционирования участка съема стекла.

ГЛАВА 6. ИНЖИНИРИНГ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ИЕРАРХИЧЕСКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

6.1. Методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства высококачественного листового стекла

Выделяют три типа цифровых двойников: изделия, производительности и производства. На всех этапах жизненного цикла изделий и производства должна обеспечиваться интеграция информации этих трех цифровых двойников [149]. Решение задач цифровизации перспективно начинать на предприятиях, обладающих высоким уровнем автоматизации технологических процессов и производств. Современные стекольные, химические и металлургические предприятия в основном соответствуют требованиям, предъявляемым к заводам-автоматам.

Основные успехи в развитии цифровых двойников достигнуты для дискретных производств. Цифровые двойники для дискретных производств более десяти лет успешно реализуются в рамках концепции управления жизненным циклом продукта (PLM) с использованием программных комплексов: Siemens PLM Software (компания Siemens AG, Германия), ThingWorx (компания PTC, США), 3DEXPERIENCE (компания Dassault Systèmes SE, Франция), Лоцман (компания «Аскон», Россия) и др.

Процесс управления жизненным циклом продукта PLM включает этапы от определения концепции, инженерного проектирования и производства до обслуживания и утилизации произведенных продуктов [114]. Этапы жизненного цикла изделия определенных в ГОСТ Р 56135-2014 «Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения» [414] и систем автоматизации ГОСТ Р 57318-2016 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Применение и управление процессами

системной инженерии» [415] показывает, что с точки зрения реализации цифровых двойников можно определить следующие этапы жизненного цикла изделия:

1. системный дизайн изделия,
2. разработка изделия,
3. проектирование производства,
4. введение в эксплуатацию производства,
5. эксплуатация и обслуживание производства,
6. модернизация и вывод из эксплуатации производства,
7. эксплуатация и обслуживание изделия,
8. модернизация и вывод из эксплуатации изделия.

На рисунке 6.1 показаны этапы жизненного цикла изделия с точки зрения цифровых двойников.

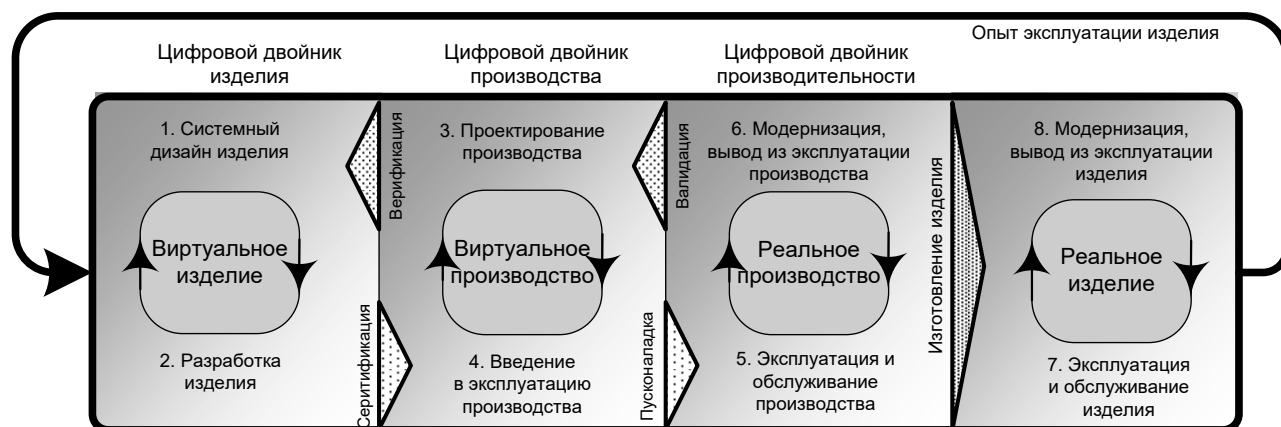


Рисунок 6.1 - Жизненный цикл цифровых двойников

Цифровой двойник производства – это комплекс конструкторских моделей и математических моделей функционирования технологического оборудования, обеспечивающий виртуальное выполнение технологического процесса. Комплекс моделей позволяет оценить качество производственного процесса на этапе проектирования до начала фактического производства изделий. Моделирование производства в разных условиях функционирования с помощью цифрового двойника и анализ полученных результатов позволяет разработать оптимальные стратегии производства. Для повышения эффективности можно создать цифровые двойники изделий для всего

технологического оборудования, однако это редко бывает экономически целесообразно. На этапе функционирования реального производства проводится анализ технологической информации, поступающей в реальном времени. Результаты этого анализа являются основой модернизации цифрового двойника производства для повышения степени его адекватности реальному производству.

В наибольшей степени цифровые двойники производства востребованы на опасных производствах, на которых протекают физико-химические реакции с выделением тепла, окислением и/или высоким давлением. Нарушение проектного функционирования таких производств могут вызывать аварийные ситуации со значительным ущербом не только для оборудования, но также для персонала и окружающей среды.

Для управления непрерывными технологическими процессами (НПТП) применяют автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУТП). Жизненный цикл АСУ ТП за исключением этапа вывода из эксплуатации регламентируется ГОСТ 34.601-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания». Современное развитие систем математического моделирования и управления проектами позволяет рассмотреть стадии 1-6 ГОСТ 34.601-90 [457, 487] как соответствующие этапы создания цифрового двойника производства.

Методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС включает этапы:

1. Определение множества требований R к производству и их анализ на полноту и непротиворечивость. При описании требований по стандарту ISO 29148 [458] упрощается анализ на основе моделирования требований в виде диаграмм UML и методами математической логики [459]. Управление требованиями должно осуществляться в информационной системе.

2. Определение множества моделей M для реализации требований R . Для определения характеристик оборудования и прогнозирования изменения количественных показателей технологических процессов разрабатывается комплекс взаимосвязанных сценариев, математических моделей материальных и тепловых балансов. Основные подходы к моделированию НППП в химической промышленности рассмотрены в работах [19, 329, 460, 461]. Результаты комплексного моделирования позволяют уточнить множество требований R .

3. Генерация документации технического задания на основе R и согласование его с заказчиком. Разработка шаблонов для информационной системы управления требованиями позволяет автоматически формировать документацию технического задания с учетом пожеланий заказчика.

4. Определение оптимального множества структур оборудования $E_{\text{ОПТ}}$ и генерация документации эскизного проекта. Применение многокритериальной оптимизации [234] с учетом требований R обеспечивает выбор оптимального комплекта оборудования, определение функций и уровни безопасности системы управления НППП [167].

5. Определение множества состояний S структур оборудования $E_{\text{ОПТ}}$. Для анализа функционирования производства выполняется описание состояний системы управления [462]. Математический аппарат конечных автоматов предоставляет возможности генерации полного множества состояний S_{Π} и выделение множества возможных состояний системы управления S_B . Формирование документации технического проекта.

6. Генерация на основе множества состояний S_B программного обеспечения на языке SFC [463], его отладка.

7. Анализ технологических параметров баз данных реального времени SCADA и MES-систем для разработки мероприятий для повышения соответствия проектных и реальных параметров ТП.

Помимо приведенных выше этапов инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования

АСУ ТП жизненный цикл производства ВЛС включает этапы: обучение персонала на тренажерах, монтаж оборудования, пусконаладка, запуск, эксплуатация, остановка, техническое обслуживание и ремонт оборудования, модернизация и утилизация оборудования.

Для создания информационной системы инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС должны выполняться следующие функции:

1. Загрузка исходных требований к НППП из структурированных файлов MS Word, MS Excel и HTML
2. Разработка и анализ требований на разработку НППП.
3. Управление математическим моделированием технологического процесса и функционированием оборудования.
4. Загрузка исходной информации о технических и конструкционных характеристиках оборудования.
5. Оптимизация структуры и состава оборудования НППП.
6. Анализ состояний технологического процесса и оборудования НППП.
7. Генерация программного обеспечения программируемых логических контроллеров НППП.
8. Генерация технического задания на разработку НППП, эскизного и технического проектов.
9. Анализ технологической информации.

Диаграмма вариантов использования информационной системы инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС показана на рисунке 6.2.

Для реализации функций инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС ИС должна взаимодействовать с внешними объектами:

1. Структурированные файлы MS Word, MS Excel и HTML. Они используются для загрузки в ИС требований к НППП и исходной информации о технических и конструкционных характеристиках оборудования.
2. Программные комплексы ANSYS, ЛОГОС, MatLab, gProms, SimInTech, AnyLogic для математического и имитационного моделирования.
3. Среды разработки Step7, CodeSys, SimInTech для обеспечения создания и тестирования программного обеспечения программируемых логических контроллеров на основе языка программирования стандарта IEC61131-3 Sequential Function Chart (последовательные функциональные схемы).
4. Структурированные файлы MS Word, MS Excel и HTML. Они содержат сгенерированные ИС на основе шаблонов технического задания на разработку НППП, эскизный и технический проекты.
5. Базы данных реального времени SCADA и MES систем обеспечивают получение технологической информации для анализа соответствия проектных и реальных параметров ТП.

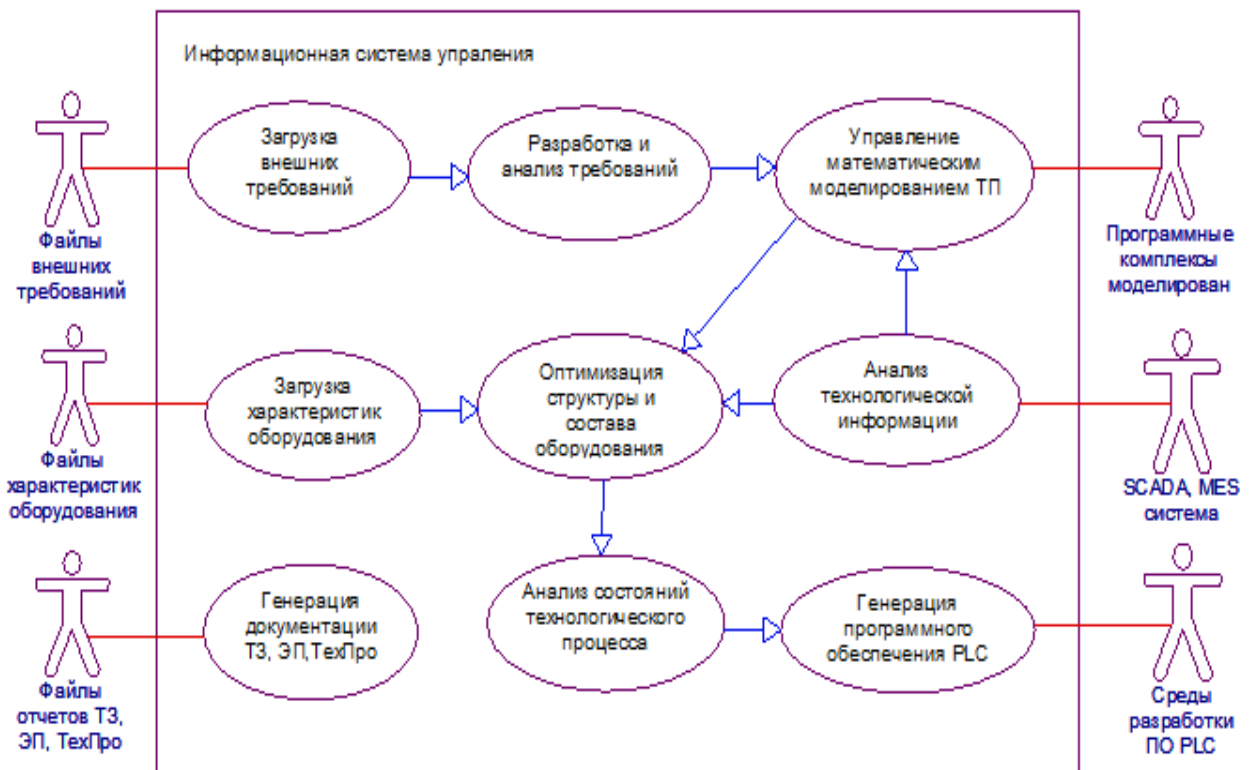


Рисунок 6.2 - Диаграмма вариантов использования информационной системы инжиниринга программного обеспечения проектирования АСУ ТП

Внешние системы ИС инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС определяют форматы и характеристики входной и выходной информации.

Архитектура информационной системы. С учетом требований функций инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС и взаимодействия с внешними системами разработана архитектура ИС инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС [465]. Основой архитектуры ИС является база данных (БД), которая обеспечивает сбор, хранение и предоставление для обработки информации, получаемой на всех этапах жизненного цикла производства ВЛС. ИС состоит из следующих элементов (подсистем):

1. «Редактор требований»,
2. «Анализ требований»,
3. «Редактор параметров математических моделей»,
4. «Анализ результатов моделирования»,
5. «Интерфейс с системами моделирования»
6. «Редактор шаблонов отчетов»,
7. «Генерация технического задания»,
8. «Редактор структуры оборудования»,
9. «Оптимизация структуры оборудования»,
10. «Генерация эскизного проекта»,
11. «Редактор состояний технологического процесса»,
12. «Анализ состояний технологического процесса»,
13. «Генерация технического проекта»,
14. «Генерация программного обеспечения»
15. «Анализ технологических параметров»,
16. «Интерфейс с базами данных реального времени»,

17. «База данных».

Архитектура ИС инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС показана на рисунке 6.3.

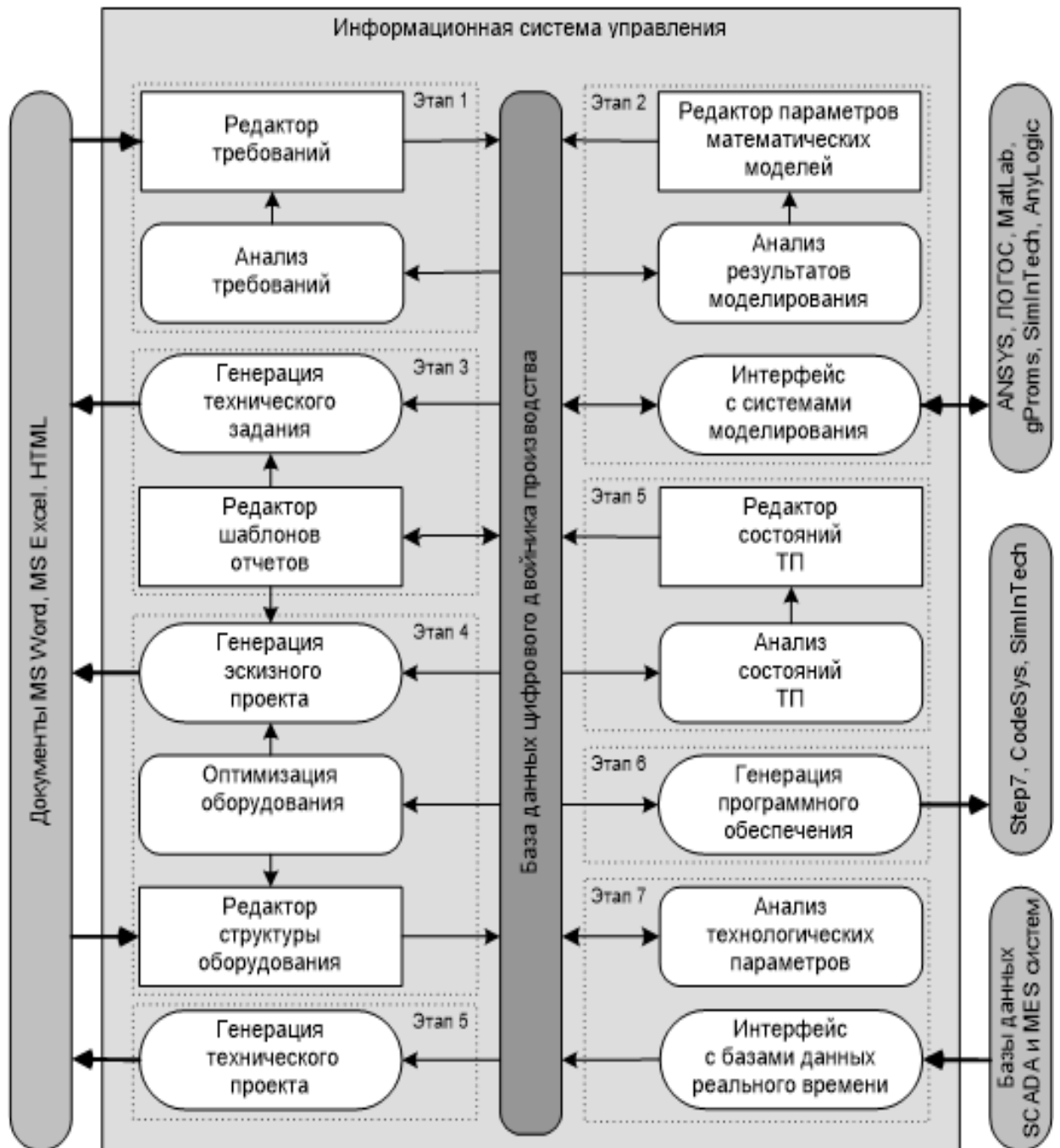


Рисунок 6.3 - Архитектура ИС инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС

Функционирование ИС инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства

ВЛС осуществляется в следующей последовательности [498]:

1. Описание требований и разработка диаграмм UML/SysML: требований, вариантов использования и последовательности обеспечивает подсистема «Редактор требований». Требования к НППП, разработанные в рамках комплексных проектов в программных комплексах управления требованиями IBM Doors, TeamCenter, Synergy и др. могут быть загружены в «Редактор требований» через структурированные файлы MS Word, MS Excel и HTML. Разработанные требования и диаграммы сохраняются в БД ИС.

2. Анализ полноты и непротиворечивость требований и диаграмм UML/SysML из БД ИС методами математической логики обеспечивает подсистема «Анализ требований». На основе результатов анализа в подсистеме «Редактор требований» уточняются формулировки и связи требований.

3. На основе разработанных требований определяют состав и виды математических моделей, необходимых для моделирования функционирования производства. Описание параметров математических моделей (начальные значения, граничные условия и т.д.) с учетом особенностей систем моделирования ANSYS, ЛОГОС, MatLab, gProms, SimInTech, AnyLogic и т.д. обеспечивает подсистема «Редактор параметров математических моделей». Разработанные параметры математических моделей сохраняются в БД ИС.

4. Учет особенностей информационного обмена с системами моделирования ANSYS, ЛОГОС, MatLab, gProms, SimInTech, AnyLogic обеспечивает подсистема «Интерфейс с системами моделирования».

5. Анализ результатов моделирования и управление экспериментами для получения необходимых результатов обеспечивает подсистема «Анализ результатов моделирования». Результаты комплексного моделирования позволяют уточнить требования.

6. Автоматическое формирование документации технического задания на основе шаблонов и информации из БД ИС о требованиях к НППП обеспечивает подсистема «Генерация технического задания».

7. Разработку шаблонов документации технического задания, эскизного проекта (ЭП) и технического проекта с учетом пожеланий заказчика на основе информации из ИС обеспечивает подсистема «Редактор шаблонов отчетов». Разработанные шаблоны сохраняются в БД ИС

8. Загрузку в БД ИС технических и конструкционных характеристик оборудования из структурированных файлов форматов (MS Word, MS Excel и HTML) и формирование структуры оборудования на основе требований и описания НППП из БД ИС обеспечивает подсистема «Редактор структуры оборудования». Разработанные структуры оборудования сохраняются в БД ИС.

9. Многокритериальную оптимизацию структуры и выбор оптимального состава оборудования НППП обеспечивает подсистема «Оптимизация структуры оборудования».

10. Автоматическое формирование документации эскизного проекта на основе шаблонов и информации из БД ИС о требованиях к НППП и выбранной структуре оборудования обеспечивает подсистема «Генерация эскизного проекта».

11. Определение состояний НППП, их взаимосвязи и условия перехода из состояния в состояние обеспечивает подсистема «Редактор состояний технологического процесса». Разработанные состояния сохраняются в БД ИС. Состояния являются основой для разработки тренажеров обучения операторов ТП [464].

12. Генерацию полного множества состояний и выделение множества возможных состояний системы управления обеспечивает подсистема «Анализ состояний технологического процесса». По результатам анализа корректируется описание состояний технологического процесса.

13. Автоматическое формирование документации технического проекта на основе шаблонов и информации из ИС обеспечивает подсистема «Генерация технического проекта».

14. Преобразование состояний технологического процесса из ИС в стандартный язык SFC для программирования программируемых логических контроллеров с учетом особенностей сред разработки Step7, CodeSys, SimInTech обеспечивает подсистема «Генерация программного обеспечения».

15. Учет особенностей информационного обмена с БД реального времени SCADA и MES систем обеспечивает подсистема «Интерфейс с базами данных реального времени».

16. Сравнение результатов математического моделирования и значений технологических параметров функционирования ТП обеспечивает подсистема «Анализ технологических параметров». Результаты анализа технологических параметров позволяют уточнить математические модели, сделать их более адекватными реальным технологическим процессам [465].

Реализация этапов алгоритма инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС на основе информационной системы инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС позволит сократить время проектирования и уменьшить количество необоснованных проектных решений.

Цифровые платформы умного производства.

В соответствии ГОСТ Р 59799-2021 «Национальный стандарт Российской Федерации «Умное производство модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)) [139] «техническими активами» или «активами» называются технические объекты, для которых «изменение стоимости» или «владелец» являются важными аспектами (рисунок 6.4).

На рисунке 6.4 сечениями по слоям оси «Иерархия автоматизации» показаны ЦП, которые обеспечивают функционирование традиционных уровней автоматизированных систем управления (АСУ): 1) АСУ отрасли (корпорации) (АСУО) – слой 7, 2) АСУ предприятия (АСУП) – слой 6, 3) АСУ

производственных процессов (АСУПП) – слой 5, 4) АСУ технологических процессов (АСУТП) – слои 2-4. Цифровые платформы (ЦП) уровней АСУ разделяются по уровню агрегации информации и частоте решения задач сбора информации и управления [497].

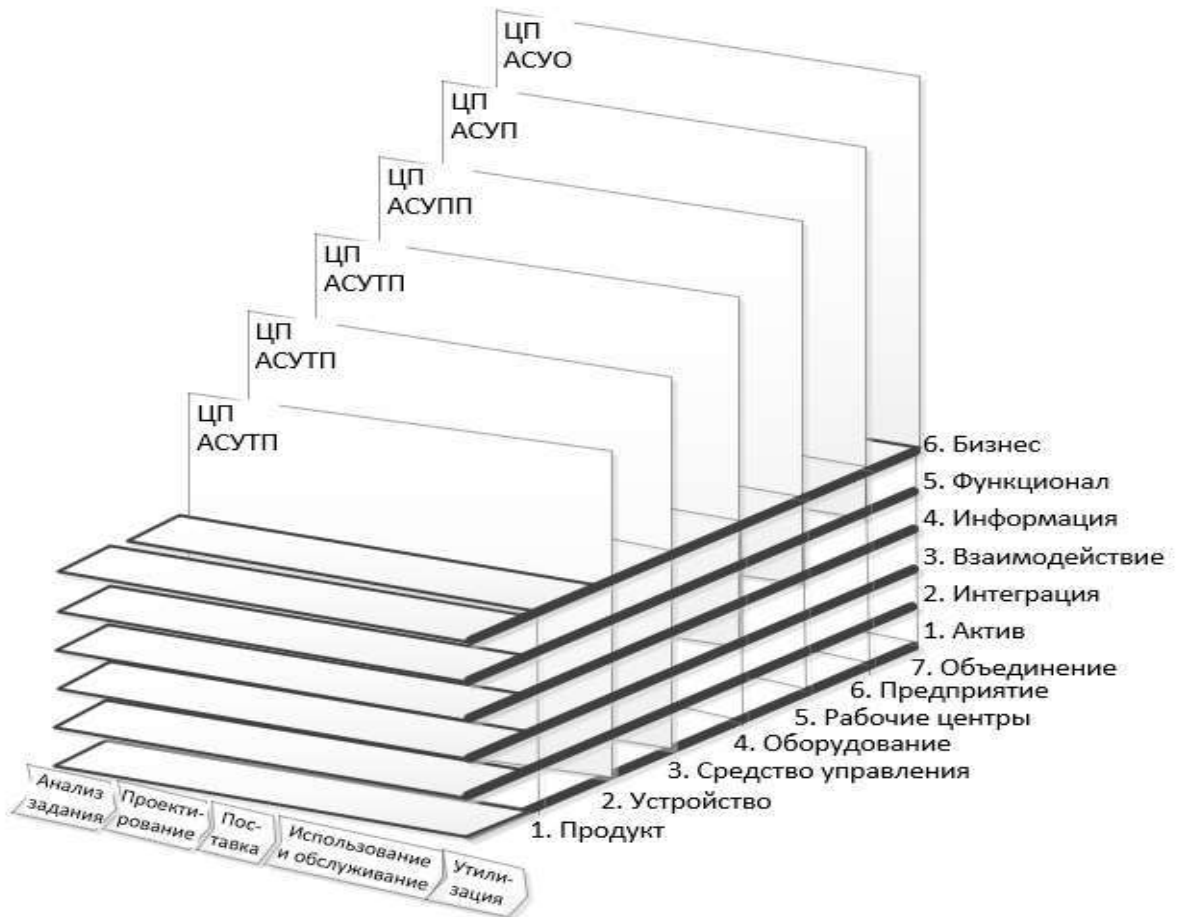


Рисунок 6.4 - Структура эталонной архитектуры Индустрии 4.0

Для обеспечения цифровизации предприятий с непрерывным характером производства предлагается структура взаимодействия ЦП (рисунок 6.5).

Уровень АСУО обеспечивает стратегическое управление эффективностью бизнеса на основе анализа: данных консолидированной отчётности предприятий, показателей деятельности отдельных предприятий отрасли, результатов производственно-экономического моделирования. На уровне АСУО цифровой двойник производства реализуют ЦП: AnyLogic, Business Studio и др., а цифровой двойник производительности – ЦП: 1С CPM, SAP, Business Studio, Loginom и др. Интеграция с уровнем АСУП обеспечивается с использованием

стандартных интерфейсов: SQL, ODBC, DLL / SO; форматов: HTML, XML, CSV, TXT.

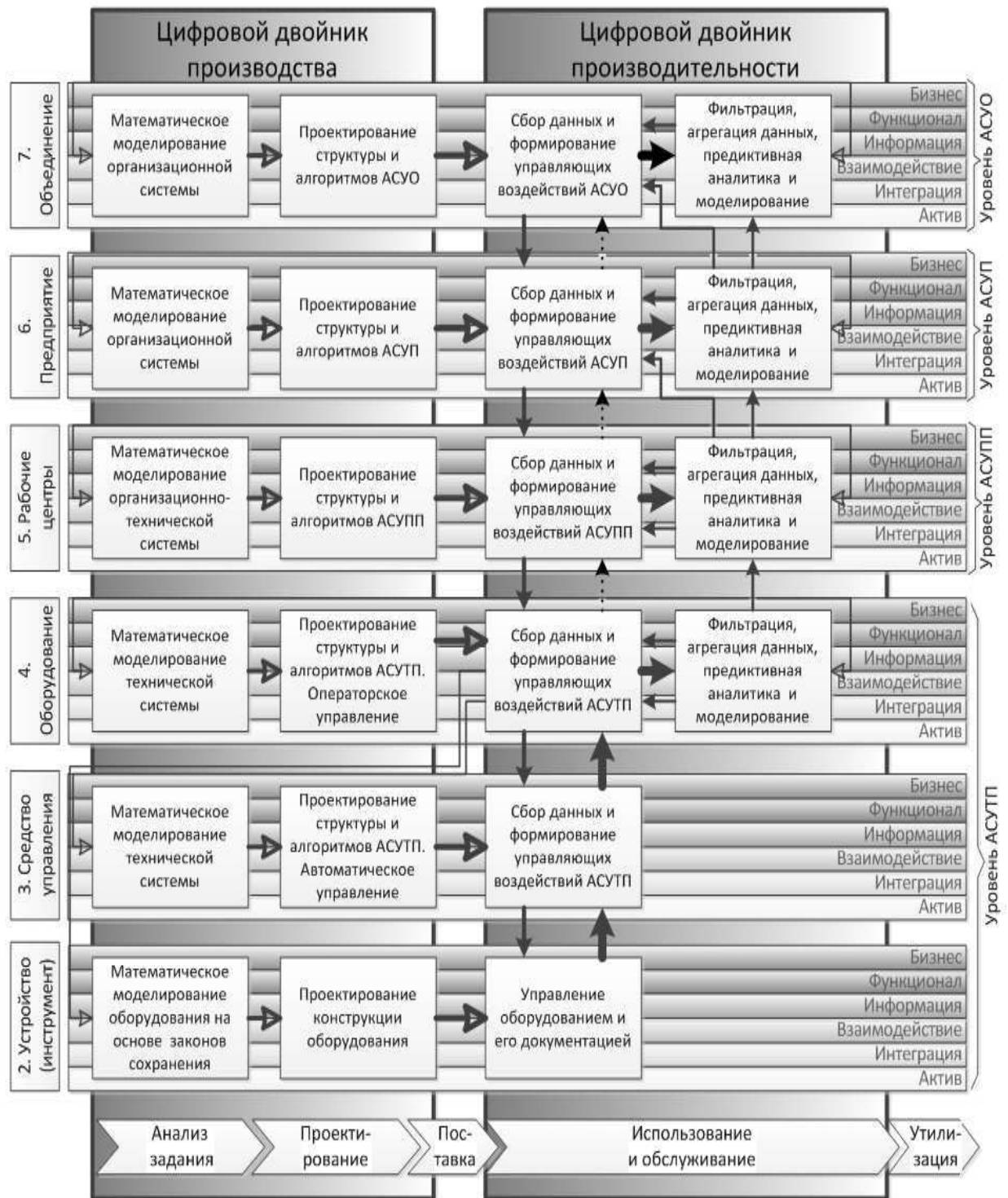


Рисунок 6.5 - Блок-схема структуры информационного взаимодействия цифровых платформ

Уровень АСУП реализует оперативное управление: планированием производства, запасами сырья и материалов, сервисным обслуживанием

оборудования, проектами, поставками, снабжением, сбытом, финансами, персоналом, документооборотом, ИТ-сервисами, информационной безопасностью. На уровне АСУП цифровой двойник производства реализуют ЦП: AnyLogic, Business Studio, ARIS и др., а цифровой двойник производительности – ЦП: 1C ERP, SAP ERP, Business Studio, Loginom и др. (рисунок 6.6).

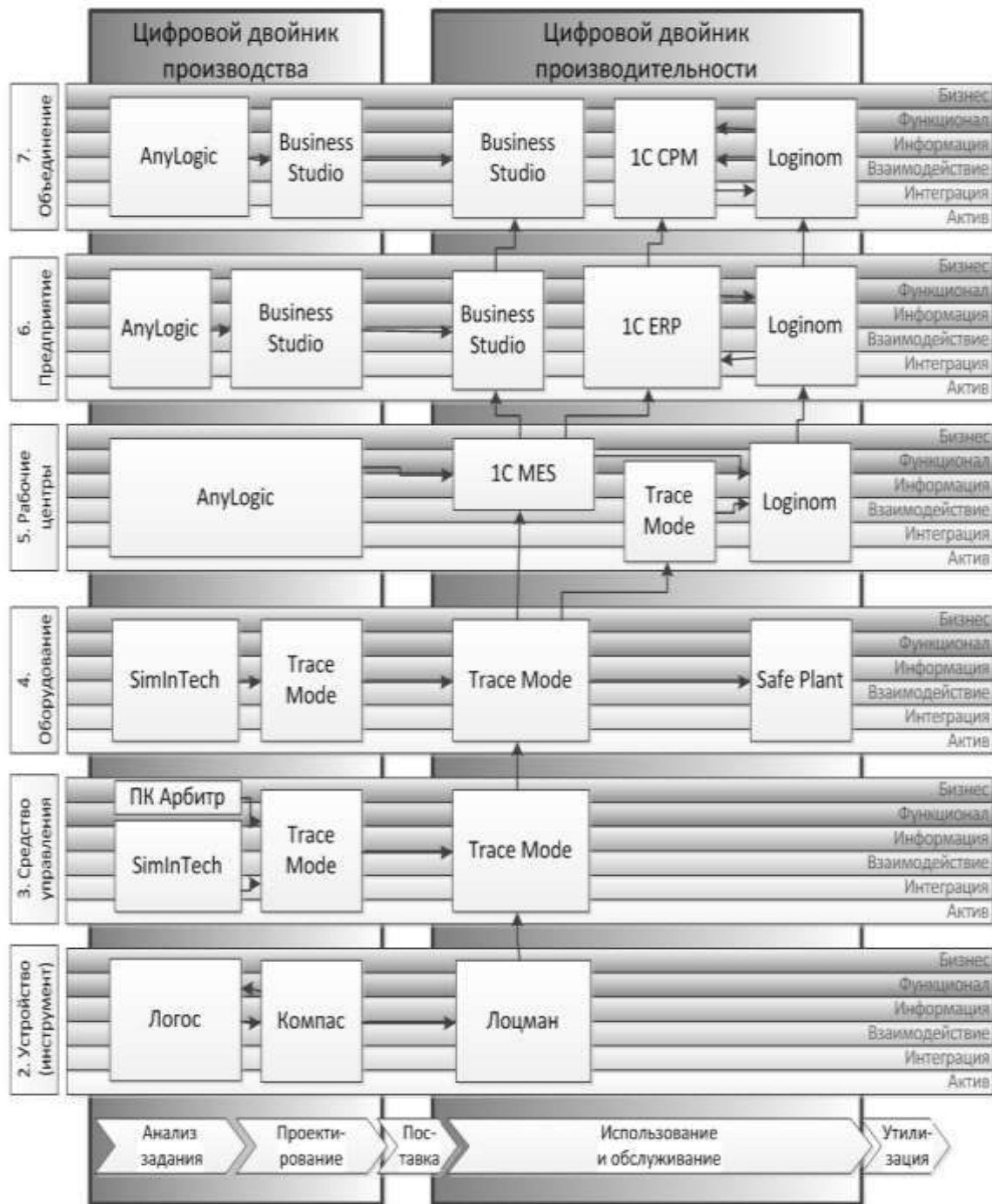


Рисунок 6.6 - Блок-схема структуры информационного взаимодействия ЦП

Интеграция с уровнем АСУПП обеспечивается с использованием стандартных интерфейсов: SQL, ODBC, DLL / SO; форматов: HTML, XML, CSV, TXT.

Уровень АСУПП обеспечивает управление детальным планированием производственных заданий, качеством продукции, технологической документацией, производственными процессами, анализом производительности и оперативно-диспетчерским управлением производством. Его реализуют цифровые платформы: 1С MES, Orpcenter, Trace Mode T-Factory и др. На уровне АСУПП цифровой двойник производства реализуют ЦП: AnyLogic, Plant Simulation, Arena др., а цифровой двойник производительности – ЦП: 1С MES, Orpcenter, Trace Mode T-Factory, Loginon и др., Интеграция с уровнем АСУТП обеспечивается с использованием стандартных интерфейсов: OPC DA / HDA / UA, SQL, ODBC, DLL / SO; форматов: HTML, XML, CSV, TXT.

Уровень «АСУТП. Операторское управление» реализует сбор технологических параметров, визуализацию технологических параметров на мнемосхемах SCADA-систем, контроль действий оператора, автоматический контроль технологических параметров и управление технологическим процессом в целом для обеспечения выполнения производственных заданий. На этом уровне цифровой двойник производства реализуют ЦП: MatLab, SimInTech, Trace Mode, PCS7 и др., а цифровой двойник производительности – ЦП: Trace Mode, PCS7, Safe Plant и др. Интеграция с уровнем «АСУТП. Автоматическое управление» обеспечивается с использованием стандартных интерфейсов: OPC DA / HDA / UA, ODBC, DLL / SO; форматов: HTML, XML, CSV, TXT; открытых промышленных протоколов МЭК 60870-5-104, MODBUS, SNMP, HART.

Уровень «АСУТП. Автоматическое управление» реализует: сбор данных о технологических параметрах, автоматический контроль технологических параметров, автоматическое регулирование технологических параметров, противоаварийную защиту. На этом уровне цифровой двойник производства реализуют ЦП: MatLab, SimInTech, Trace Mode, PCS7 и др. Интеграция с уровнем «АСУТП. Технические устройства» обеспечивается с использованием

стандартных интерфейсов OPC DA / HDA / UA, MQTT; открытых промышленных протоколов МЭК 60870-5-104, MODBUS, SNMP, HART.

Уровень «АСУТП. Технические устройства» обеспечивает хранение информации о технических устройствах производства. На этом уровне цифровой двойник производства реализуют ЦП: Логос, ANSYS, COMOS, Siemens PLM Software, Компас и др.

На рисунках 5.5 и 5.6 незакрашенные стрелки обозначают периодическую передачу информации между ЦП, закрашенные стрелки обозначают постоянную передачу информации между ЦП. Толщина стрелок показывает объемы передаваемой информации.

Таким образом, для модели эталонной архитектуры Индустрии 4.0 на основе отечественных цифровых платформ разработана структура цифрового двойника предприятия и производительности непрерывного производства (рисунок 6.6). Показаны взаимодействия ЦП, которые обеспечивают функционирование цифрового двойника предприятия и производительности. Предложенная структура ЦП цифрового двойника предприятия непрерывного производства позволяет оценить информационные потоки [483].

Структура программного комплекса разработки мобильных роботов для складских операций и отгрузки упакованного листового стекла.

Для складских операций и отгрузки упакованного листового стекла могут использоваться мобильные роботы (МР). Для управления жизненным циклом мехатронных систем разработана создана структура программного комплекса [454, 488] (рисунок 6.7).

Обеспечение быстрой разработки и эффективного выполнения функций МР возможно на основе интегрированного применения технологий управления жизненным циклом. Эти технологии можно разделить на пять групп:

- 1) Анализа надежности, безопасности, технического риска на основе ПК «Арбитр».

2) Управления жизненным циклом аппаратных средств «ЛОЦМАН: PLM» или Siemens PLM Software.

3) Управления жизненным циклом программного обеспечения МР на базе методики IBM Harmony, среды проектирования IBM Rhapsody и комплекта разработчика «Нейтрино».

4) Автоматизация производства с применением концепции Totally Integrated Automation (TIA).

5) Эксплуатация и обслуживание МР по состоянию и учет ресурса в цифровой платформе 1С.

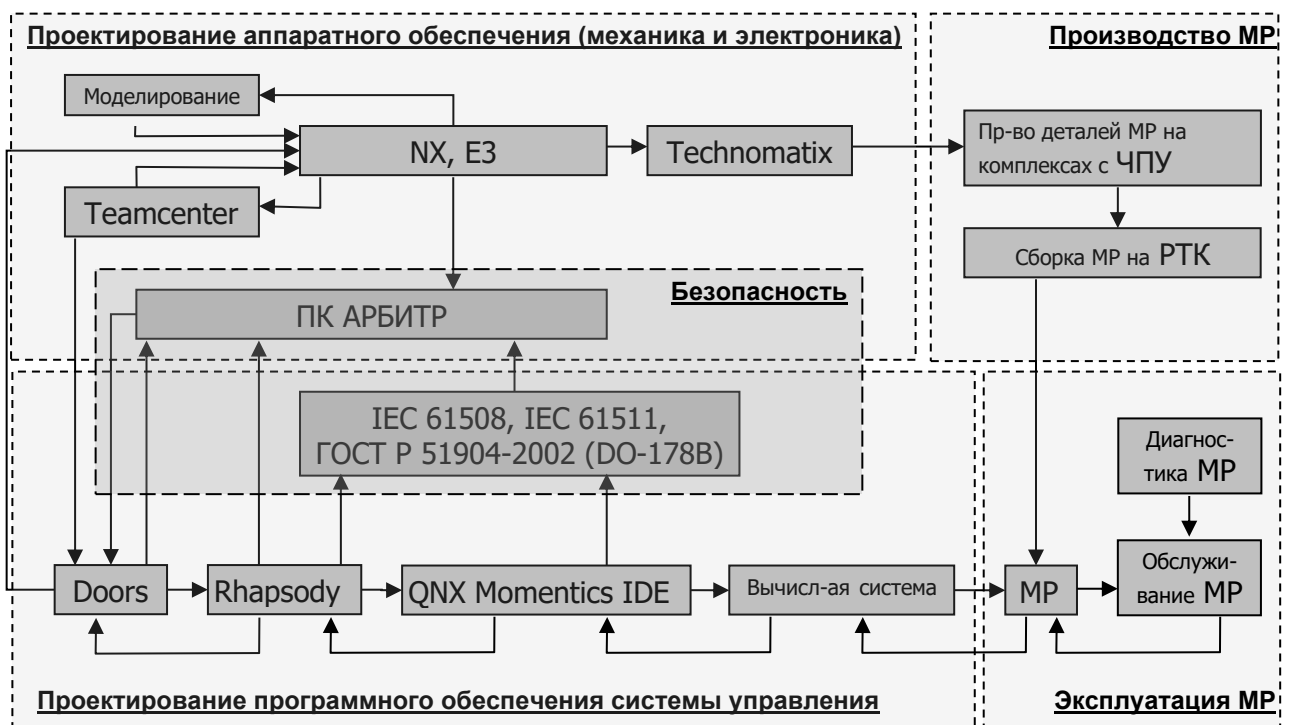


Рисунок 6.7 - Интегрированная система управления жизненным циклом мобильного робота

В результате проведенных научно-исследовательских работ по гранту Министерства образования и науки РФ "Разработка распределенной вычислительной среды для создания систем управления жизненным циклом мобильных мехатронных систем" № 02.740.11.0482. (шифр «2009-1.1-000-082») в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы на факультете электронной техники и приборостроения Саратовского

государственного технического университета разработана образовательная среда управления жизненным циклом МР (рисунок 6.7). Она предназначена для обучения студентов созданию систем управления реального времени и изучения особенностям управления жизненным циклом встраиваемых систем.

Образовательная среда включает: систему управления ресурсами предприятия SAP ERP, систему управления жизненным циклом изделий машиностроения Siemens PLM Software, операционную систему QNX Neutrino, среду разработки программного обеспечения QNX Momentics IDE, среду моделирования программного обеспечения IBM Rhapsody, программный комплекс расчета надежности «Арбитр» и аппаратные средства.

В состав аппаратных средств входят: одноплатный компьютер CPB905 с интерфейсом PC104+ (компания Fastwel) и распределённой периферией FASTWEL I/O, плата CNM-350 формата PC104+, обеспечивающая навигацию ГЛОНАСС/GPS, одноплатный компьютер AS SAM9 с интерфейсом SPI (компания Аргусофт), гироскоп ADIS16405 (компания Analog Devices), стереоскопическая камера VEA-830 (компания ЭВС), радиомодемы Невод-5 (компания Геолинк), комплекс датчиков исполнительных устройств, мобильная платформа МП-М4401, система управления электропитанием и диагностическая система на основе оборудования Single Board RIO 9631 (компания National Instruments).

1. Технология управления требованиями и функционального анализа. Для формирования требований и их изменений в процессе разработки мехатронной системы используется программный пакет Doors, интегрированный с системой Teamcenter.

Проектная оценка надежности МР выполнена по методике, основанной на применении новой информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования систем, реализованной в программном комплексе (ПК) АРБИТР (рисунок 6.8).

Надежность и безопасность современных организационных и технических систем являются важной составляющей их качества.

Рисунок 6.8 - Применение ПК «Арбитр» для анализа надежности МР

А также необходимым условием обеспечения надежности и безопасности производственных объектов. Главная цель анализа надежности и безопасности - своевременное получение достоверной информации о свойствах надежности и безопасности систем, необходимой для выработки, обоснования и реализации эффективных проектных и эксплуатационных решений.

ПК «Арбитр» позволяет на основе схем функциональной целостности (описание «правильного» функционирования объекта) автоматически строить деревья отказов, которые являются основой для построения систем технической диагностики сложных объектов управления.

При создании встраиваемых систем с ранних этапов жизненного цикла необходимо учитывать требования специальных стандартов: ГОСТ Р 51904-2002, IEC 61508 и IEC 61511. Стандарт ГОСТ Р 51904-2002 «Программное обеспечение встроенных систем: общие требования к разработке и документированию» является аналогом стандарта DO-178B.

2. Технологии управление жизненным циклом аппаратных средств МР. Повышение эффективности функционирования и конкурентоспособности машиностроительных предприятий в современных условиях невозможно без автоматизации управления жизненным циклом продукции (PLM – Product Lifecycle Management). Концепция PLM предполагает интеграцию в единой базе данных предприятия исчерпывающей информации об изделиях и производственных процессах на всех этапах жизненного цикла. Системы PLM объединяют САПР, CAM, PDM и технологии производства в единое целое с новыми качественными возможностями и обеспечивают предприятиям лидирующие позиции посредством инновационного совершенствования изделий. Одной из наиболее эффективных PLM-систем является система компании Siemens PLM Software (рисунок 6.9), которая состоит из трех подсистем: проектирования изделий «NX»; автоматизированной подготовки производства «Tecnomatix»; управления и хранения информации об изделиях «Teamcenter».

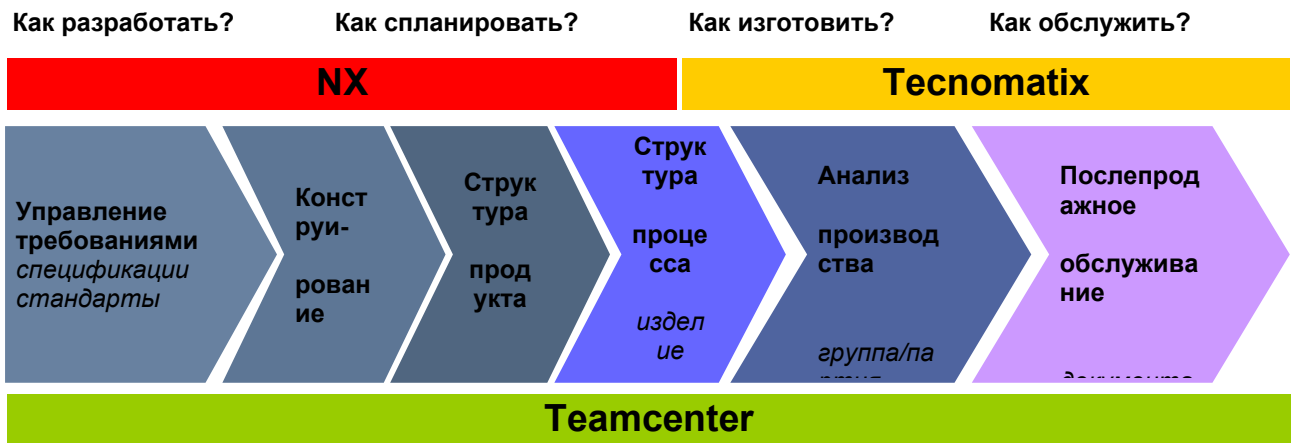


Рисунок 6.9 - Управление жизненным циклом аппаратных средств МР

3. Технологии управление жизненным циклом программного обеспечения МР. Основой сложных мехатронных систем являются операционные системы жесткого реального времени: LynxOS-178, VxWorks AE 653, Microware OS-9, OC2000, QNX Neutrino. По критерию технологической независимости в России можно использовать только операционные системы QNX Neutrino и OC2000. Интегрированная среда разработки QNX Momentics IDE обеспечивает, помимо разработки и компиляции приложений встраиваемых систем для работы в операционной системе QNX Neutrino для нескольких аппаратных платформ (MIPS, PowerPC, StrongARM/xScale, SH-4, x86), их отладку, анализ производительности и системное профилирование. Она позволяет проанализировать взаимодействия процессов и потоков, эффективность обработки прерываний, т.е. поведение системы в целом в условиях лимита времени. Основе микроядерной операционной системы QNX Neutrino и сети QNet с несколькими вычислительными узлами реализуются вычислительные кластеры для распараллеливания вычислений и повышения надежности вычислительной системы в целом.

Для разработки системы управления МР применена методика управления жизненным циклом программного обеспечения Harmony. Эта методика реализована в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на основе нотаций UML 2.1. и SysML.

Разработка системы управления МР начинается с определения требований к ней. Для хранения сформулированных требований и их изменений в процессе разработки системы управления МР используется программный пакет Doors (рисунок 6.10). Требования передаются в среду визуального моделирования IBM Rhapsody, которая обеспечивает модельно-управляемую разработку программного обеспечения для встраиваемых систем.

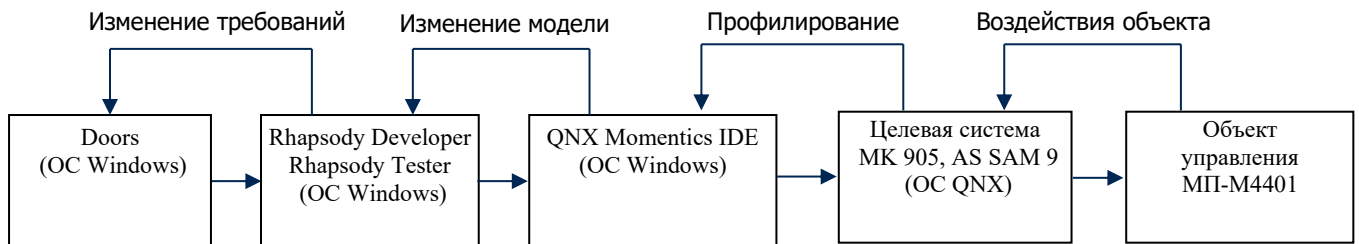


Рисунок 6.10 - Цикл разработки программного обеспечения

В диаграмме вариантов использования (ВИ) (прецедентов) определены рамки исследуемой системы, взаимосвязи ее элементов между собой и взаимодействие системы с внешними подсистемами (актерами). Каждый из ВИ формируется на основе требования и описывает в виде вербальных алгоритмов часть функциональности системы. ВИ возвращает результат своей работы актерам, не раскрывая деталей внутренней реализации этой функциональности. В структурной диаграмме из прецедентов формируются подсистемы в виде программных объектов и описываются порты взаимодействия этих объектов и внешних подсистем.

При моделировании одновременно выполняется автоматическая кодогенерация на языках программирования C, C++, Java в интегрированной среде разработки QNX Momentics IDE для операционной системы жесткого реального времени QNX Neutrino. Система IBM Rhapsody позволяет тестировать текущие результаты на любом этапе процесса разработки: от анализа требований до готовой встраиваемой системы и сократить его длительность. Она поддерживает инструменты конфигурационного управления версиями (Subversion, CVS и др.). Описанные выше технологии позволили разработать систему управления МР с подсистемами технического зрения,

планирования траектории движения отдельного робота и управление группой с учетом состава и остаточного заряда аккумуляторных батарей.

4. Технологии производства МР. Современный уровень автоматизации отдельных технологических процессов (ТП) достаточно высок, этому способствует значительное разнообразие средств их автоматизации. В таких условиях повышение эффективности функционирования промышленных предприятий основано на построении интегрированных АСУ на основе одной из концепции комплексной автоматизации. Наиболее эффективной является концепция Totally Integrated Automation (TIA), разработанная фирмой Siemens.

Уровень АСУ ТП в этой концепции реализуется на основе применения системы управления процессами SIMATIC PCS 7 (Process Control System).

SIMATIC PCS 7 – программно-технический комплекс состоящий из: промышленных контроллеров SIMATIC S7-400 и станций распределенной периферии SIMATIC ET200 с расширенными функциями диагностики; промышленных компьютеров SIMATIC PC; программного обеспечения SIMATIC; средств человеко-машинного интерфейса SIMATIC HMI; промышленных сетей SIMATIC NET и DP.

Основными достоинствами PCS7 являются: масштабируемость проектов; увеличение скорости разработки; решение вопросов обслуживания и разработки в рамках единой системы; переход от программирования к конфигурированию систем; применение типовых компонентов обычных систем SIMATIC S7 для разработки систем противоаварийной защиты; реализация уровня безопасности SIL 3 и АК 6 на обычных CPU; обеспечение работы систем управления во взрывоопасных зонах (Ex - зонах); взаимодействие с уровнями АСУ предприятия и АСУ производственных процессов.

Для демонстрации возможностей этих информационных технологий разработаны модели роботизированных технологических комплексов на основе оборудования компании Fischertechnik, управляемые оборудованием компании Siemens.

5. Технологии диагностики мобильных роботов. Построение эффективных средств в области мехатроники и робототехники неразрывно связано с созданием соответствующих инструментальных сред для испытания навигационных систем МР. Построение испытательных стендов различного назначения, разработка методик оценки надежности, контроля и диагностики МР в целом и входящих в его состав подсистем является актуальной научно-технической задачей, обеспечивающей качество функционирования оборудования и увеличивающей срок его эксплуатации.

Эффективное выполнение функций МР возможно на основе интегрированного применения технологий управления его эксплуатацией и обслуживанием. Эти технологии можно разделить на три группы:

1. Система автоматического построения тестов сложного программного обеспечения
2. Система автоматизированного тестирования и диагностики МР
3. Разработка системы математической обработки информации об испытаниях МР

Для калибровки и диагностики датчиков и исполнительных устройств МР разработан диагностический стенд (рисунок 6.11). Стенд позволяет отключить датчики и подключать диагностическое оборудование на базе National Instruments Single Board RIO 9631 (SB RIO9631) к системе управления МР. Это позволяет создать управляемую виртуальную внешнюю среду для наладки и тестирования системы управления МР.

На рисунке 6.11 цифрами обозначено: 1) диагностическое оборудование SB RIO 9631, 2) электродвигатель с энкодером, 3) система распределённого ввода/вывода Fastwel I/O, 4) система управления мобильным роботом CPB905, 5) навигационный модуль «Геос-1», 6) система управления AS-SAM9, 7) источники питания 12В, 5В, 8) сервоусилитель MOVISERVO, 9) датчик температуры ДТС3105-РТ100.В2.70, 10) датчик линии, 11) группа реле РЭК 78/4, 12) ультразвуковой датчик, 13) инфракрасный барьер, 14) гироскоп.

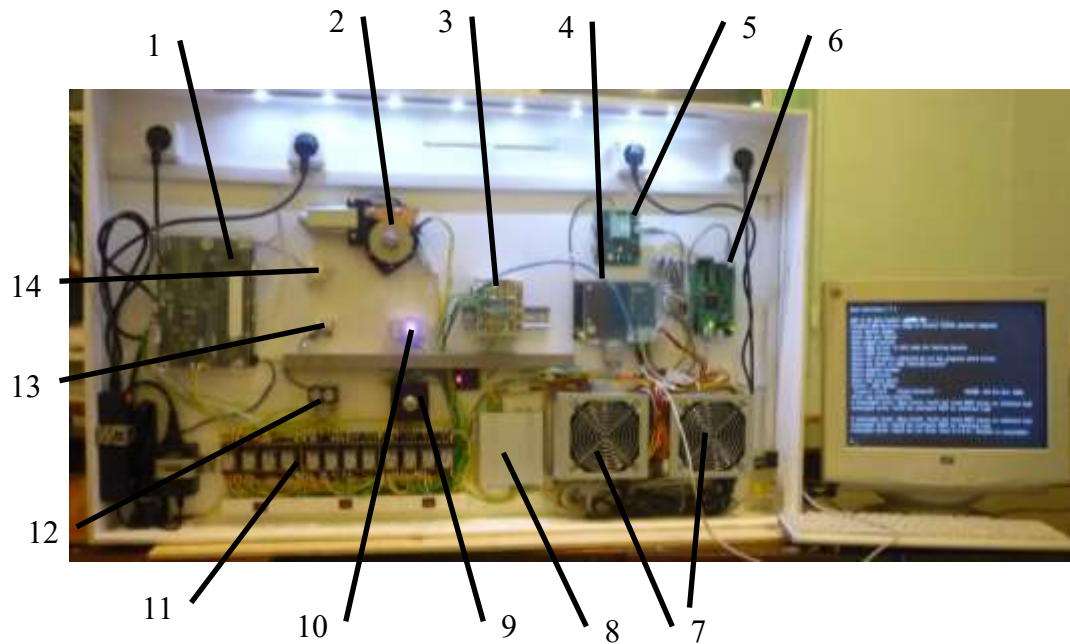


Рисунок 6.11 - Структурная схема диагностического стенда для мобильного робота

Диагностический стенд состоит из трёх подсистем: системы управления (СУ МР), датчиков и исполнительных устройств (Д/ИУ) и диагностической системы на базе SB RIO9631. На рисунке 6.12 приведены три схемы работы диагностического стенда:

- 1) соединения системы управления мобильным роботом с датчиками и исполнительными устройствами (основной режим работы);
- 2) соединение диагностического оборудования с датчиками и исполнительными устройствами (режим калибровки и поверки);
- 3) соединение системы управления МР с диагностическим оборудованием (режим управляемой виртуальной внешней среды)

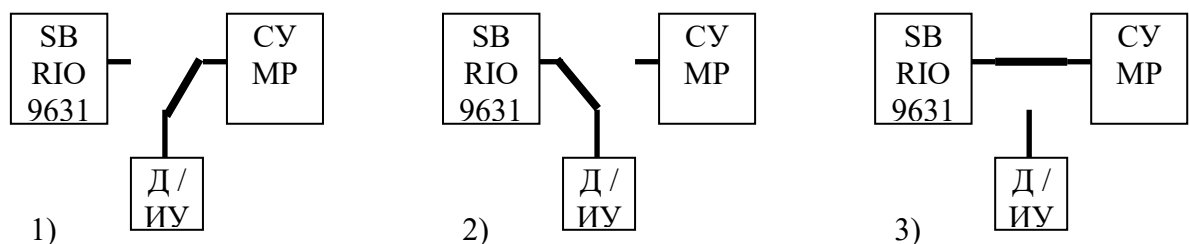


Рисунок 6.12 - Схемы подключения подсистем диагностического стенда

Для тестирования системы ввода/вывода Fastwel I/O используется SDK, разработанный компанией Fastwel (г. Москва) для операционной системы QNX6 и «Нейтрино».

Программное обеспечение LabVIEW представляет собой хороший инструмент для выполнения точных измерений, начиная от сбора данных и до вывода результата. Система National Instruments предоставляет возможность расширять возможности LabVIEW на основе набора утилит, которые разработаны для того, чтобы упростить снятие показаний с датчиков различных устройств, а также формирования сигналов для исполнительных устройств.

Системы диагностики могут быть интегрированы с цифровой платформой 1С, которая помимо основной функциональности по управлению организационными системами обеспечивают на основе управления бизнес процессами, учет состояния и управление обслуживанием сложного оборудования.

Для повышения надежности производства и повышения эффективности использования оборудования необходима эффективная система обслуживания и ремонтов оборудования, которая обладает возможностью диагностики состояния оборудования и предсказательной оценки. На сокращение сроков проектирования и внедрения производственных систем существенно влияет прозрачность и доступность информации о технологическом оборудовании, которая обеспечивается единой целостной базой данных и инструментами имитационного моделирования. Анализ результатов имитационного моделирования позволяет определить наилучшие технические решения, которые обеспечат увеличение эффективности использования выделяемых финансовых средств на модернизацию производства. Единая база данных должна иметь возможность размещения и актуализации большой нормативной базы требований в области охраны труда и окружающей среды, которые нужно соблюдать при проектировании и эксплуатации технологических процессов. С учетом этой информации разрабатываются

актуальные технические регламенты, инструкции безопасности и др. необходимые для подготовки и повышения квалификации операторов технологических процессов.

Для получения отдачи от средств, вложенных в цифровизацию производства необходима, комплексная среда, которая позволяет разрабатывать адекватные реальным технологическим процессам (ТП) математические модели и интегрировать их с базами данных реального времени. Комплексное использование статистических и аналитических математических моделей позволит создать цифровые двойник производства (ЦДП), которые обеспечивают адекватный прогноз состояния ТП в краткосрочной перспективе и понимание функционирования ТП на основе универсальных законов сохранения и других фундаментальных физических и физико-химических закономерностей [489].

6.2. Архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ управления диагностикой дефектов листового стекла

Повышение качества листового стекла играет ключевую роль в росте конкурентоспособности продукции стекольных предприятий в условиях современного рынка. Изготовление листового стекла широко используемым в настоящее время флоат-способом включает стадии подготовки шихты, стекловарения, формования ленты стекла на расплаве олова, отжига ленты стекла, ее резки на листы заданного размера и их упаковки [464, 465]. При изготовлении листового стекла имеют место нарушения параметров технологического процесса, что приводит к возникновению нежелательных оптических и физических свойств стекла [85]. Повышение производительности производства и снижение количества брака листового стекла предполагает решение задачи интеграции цифровых систем предприятия в рамках концепции Индустрия 4.0. Цифровая трансформация промышленных предприятий с непрерывным циклом производства предполагает особое внимание к определению исходных требований к

информационным системам [466 – 468]. Вопросы взаимного влияния требований анализируются с помощью графических моделей, которые становятся основой будущей структурно-функциональной архитектуры системы управления цифровым предприятием [469]. Для графического моделирования архитектуры цифрового предприятия целесообразно использования диаграммы нотации UML и SysML [470].

На основе нотаций UML 2.5. и SysML разработана методика управления жизненным циклом программного обеспечения Harmony, реализованная в среде визуального моделирования IBM Rhapsody. Схема управления жизненным циклом программного обеспечения Harmony на основе V-модели показана на рисунке 6.13. Аналогичный подход используется для поддержки проектирования интегрированной модульной авионики в комплексах инструментальных средств: UniMode, SimInTech, MASIW (Modular Avionics System Integrator Workplace) [471].

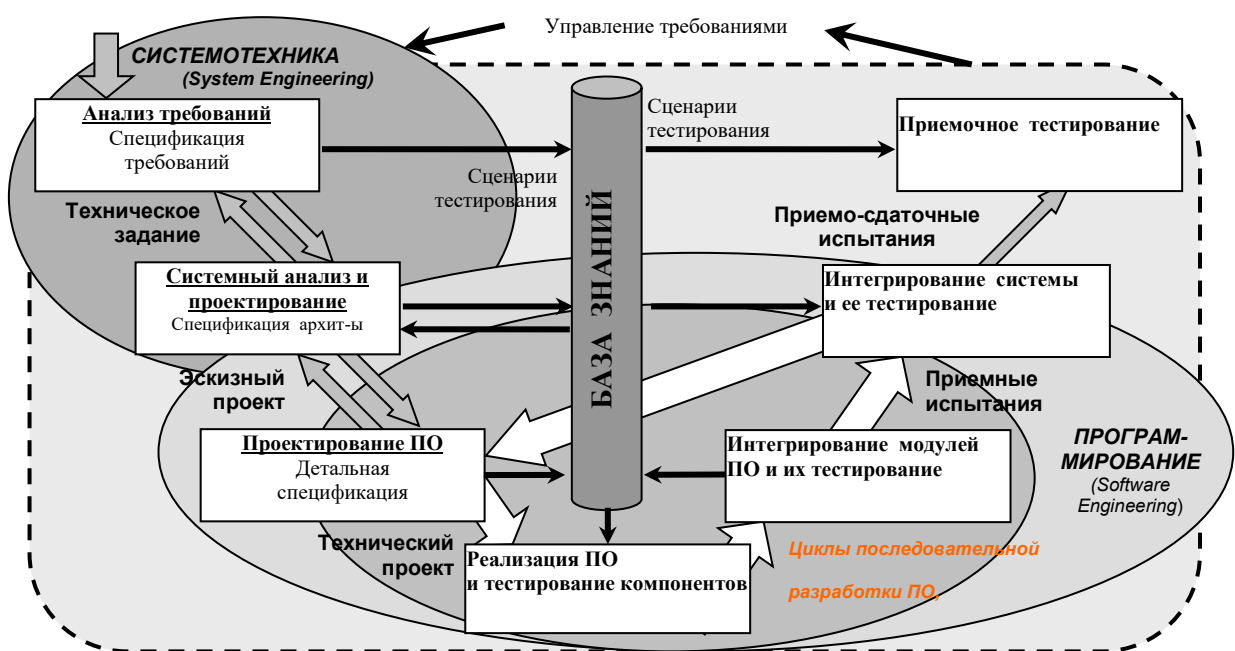


Рисунок 6.13 - Схема управления жизненным циклом программного обеспечения Harmony

В процессе производства листового стекла постоянно выполняются мероприятия по адаптации к изменениям в химическом составе сырьевых материалов, интенсификации производства, повышению качества листового

стекла и др. Все эти изменения технологического процесса должны учитываться в функционировании автоматизированных систем управления. При разработке новых автоматизированных систем управления необходимо использовать методики, ускоряющие разработку, снижающие затраты на тестирование и обеспечивающие возможности их адаптации к новым требованиям функционирования и подключения дополнительных аппаратных средств.

Для повышения производительности труда разработчиков и обеспечения адаптации автоматизированных систем управления к новым требованиям функционирования производства необходимо использовать модельно-управляемое проектирование программного обеспечения.

Программный комплекс идентификации точечных дефектов листового стекла (ПК ИТДЛС), обеспечивающий функционирование средств сбора информации с датчиков и видеокамер, автоматизированной системы управления резкой ленты стекла, автоматизированных рабочих мест (АРМ) технолога и оператора (АРМО) (рисунок 6.14). Взаимодействие указанных компонентов осуществляется через базы данных (БД) реального времени (РВ) и общей БД производства (ОБДП). БДРВ поддерживает синхронизацию, репликацию данных и их резервирование для обеспечения отказоустойчивости в реальном масштабе времени протекания технологических процессов. ОБДП обеспечивает с помощью АРМ начальника производства и АРМ технолога решение задач автоматизированной системы управления производством - MES-системы. АРМО являются составной частью соответствующих автоматизированных систем управления ТП (АСУ ТП) и обеспечивают решение задач оперативного операторского управления соответствующих ТП.

База данных реального времени обеспечивает взаимодействие комплекса программ, автоматизированной системы управления резки и упаковки листового стекла и АРМО. На промышленном компьютере автоматизированной системы управления (АСУ) резкой и упаковкой

листового стекла решается задача оптимизации раскроя ленты стекла с учетом производственного задания и размещения на ленте стекла выявленных дефектов. База данных реального времени за счет быстрого обмена информацией обеспечивает оперативное решение задачи оптимизации раскроя ленты стекла.

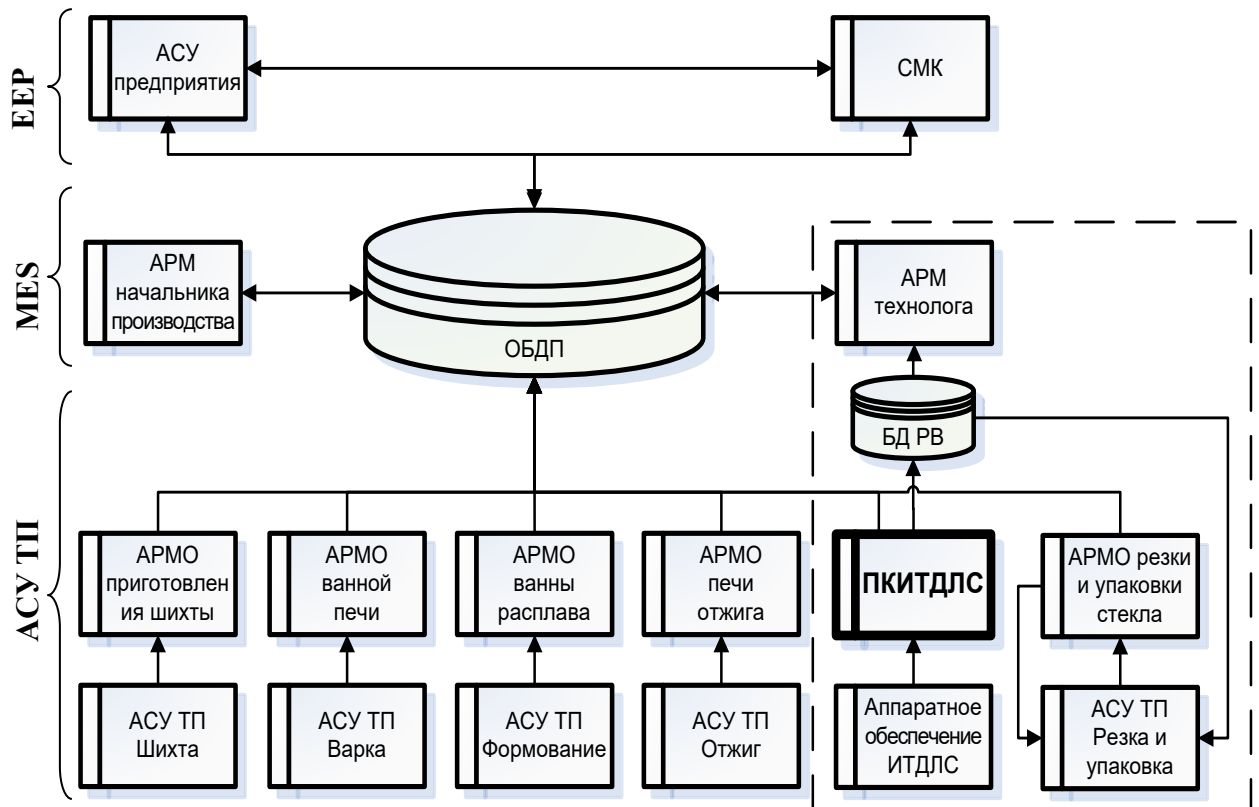


Рисунок 6.14 - Блок-схема структуры системы управления многостадийным производством листового стекла

Структура и состав комплекса программ приведены на рисунке 6.15, который функционирует в режимах настройки и идентификации точечных дефектов в реальном масштабе времени. Рассмотрим функционирование программного комплекса в режиме идентификации точечных дефектов, которое выполняется непрерывно в реальном масштабе времени. «Программа захвата изображения» П1 состоит из модулей П1М1 «Модуль захвата изображения с видеокамер», П1М2 «Модуль обработки изображений видеокамер», П1М3 «Модуль объединения изображений в единое» и П1М4 «Модуль обработки полученного изображения».

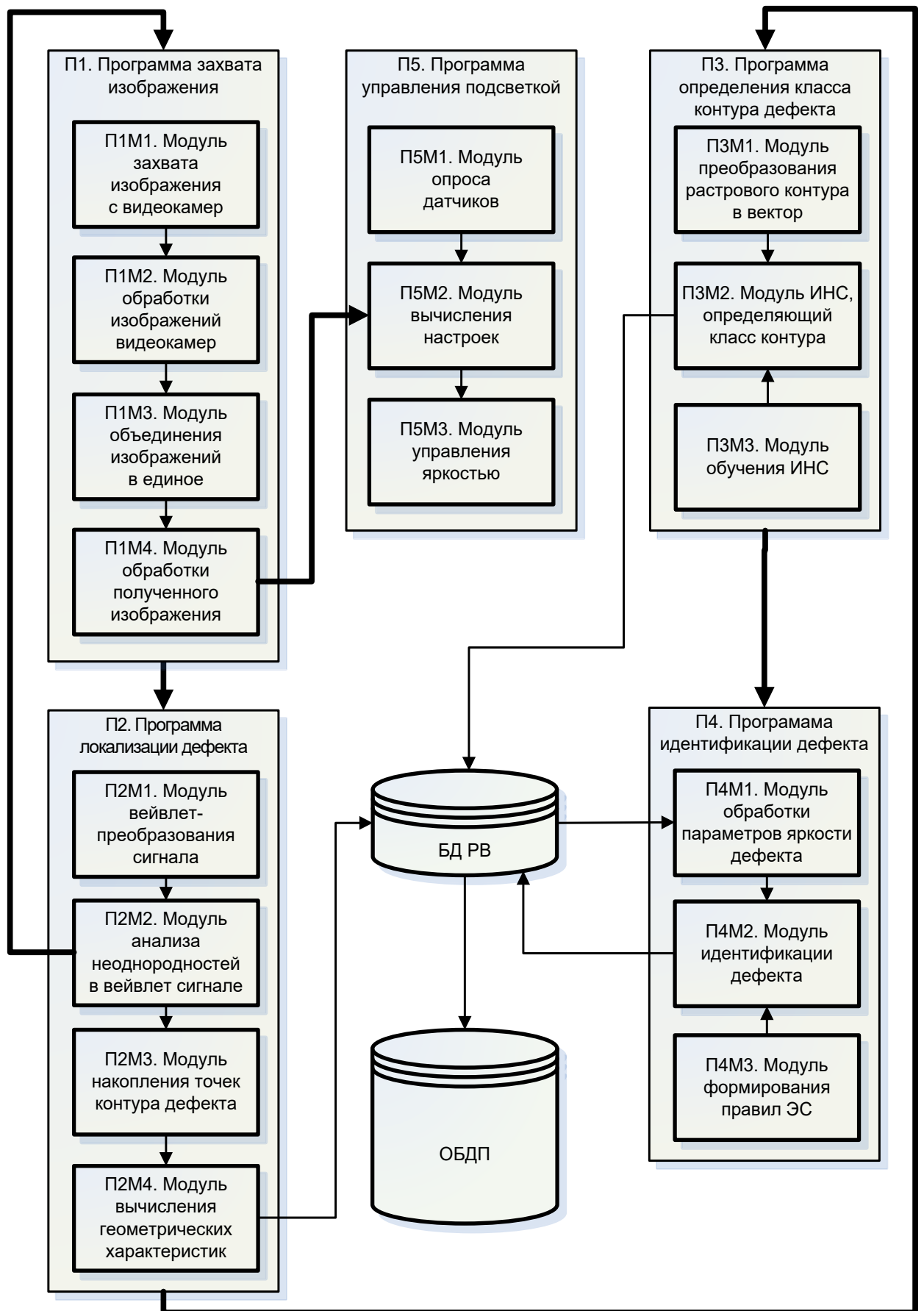


Рисунок 6.15 - Блок-схема структуры программного комплекса ИТДЛС

Модуль П1М1 обеспечивает последовательный захват изображений с каждой из линейных видеокамер, количество которых определяется максимальной шириной ленты стекла [472]. Каждое из изображений для снижения шума обрабатывается в модуле П1М2 с помощью сглаживающих фильтров камер. Далее выполняется нормализация амплитуды полученных изображений от 0 до 1. Обработанные таким образом изображения формируются в единый кадр в модуле П1М3, который обеспечивает стыковку краев изображений. В модуле П1М4 выполняется вычисление максимальной яркости изображения и сравнение с заданным эталонным значением яркости подсветки. При систематическом снижении яркости изображения запускается «Программа управления подсветкой» П5 для коррекции настроек системы подсветки.

Программа П1 передает управление П2 «Программа локализации дефекта», обеспечивающей определение координат точечного дефекта на ленте стекла и передающей их в БД РВ. Эти координаты оперативно считываются из БД РВ задачей оптимизации раскроя ленты стекла, функционирующей на промышленном компьютере автоматизированной системы управления резки и упаковки листового стекла

Программа П2 состоит из модулей П2М1 «Модуль вейвлет-преобразования сигнала», П2М2 «Модуль анализа неоднородностей в вейвлет сигнале», П2М3 «Модуль накопления точек контура дефекта» и П2М4 «Модуль вычисления геометрических характеристик».

Модуль П2М1 обеспечивает вейвлет-преобразование сигнала, полученного из программы П1, а модуль П2М2 анализирует полученное преобразование на наличие неоднородностей, которые выявляются путем пропускания полученного сигнала через систему фильтров, исключающих периодическую составляющую сигнала и выявляющих область с неоднородностью. Далее определяются координаты появления и окончания неоднородности и вычисляется среднее значение амплитуды яркости неоднородного участка вейвлет-преобразования сигнала [472]. Затем модуль

П2М2 формирует сообщение программе П1 о готовности к обработке следующего кадра. Если в ходе выполнения П2М2 выявлена неоднородность, то информация о ней передается в модуль П2М3, в противном случае обрабатывается новый кадр.

При выявлении очередной неоднородности модуль П2М3 определяет ее координаты и накапливает в соответствующем динамическом массиве. Если при очередном цикле анализа неоднородность не обнаружилась, то контур сформирован. Информация о точках контура передается в модуль П2М4.

Модуль П2М4 определяет геометрические характеристики выявленного точечного дефекта и формирует транзакции для записи их и параметров яркости дефекта в БД РВ.

Далее управление передается ПЗ «Программа определения класса контура дефекта», которая состоит из модулей ПЗМ1 «Модуль преобразования растрового контура в вектор», ПЗМ2 «Модуль ИНС, определяющей класс контура» и ПЗМ3 «Модуль обучения ИНС».

Модулем ПЗМ1 осуществляется преобразование растрового контура в векторную форму, которая далее преобразуется в совокупность скалярных значений для передачи во входной слой искусственной нейронной сети (ИНС). В модуле ПЗМ2 определяется тип контура дефекта, который соответствует конкретному номеру возбужденного нейрона сети. Первый выход сети соответствует типу «гладкий контур», а второй - типу «контур с изломами». Для передачи в БД РВ результатов классификации модуль ПЗМ2 формирует транзакцию, на основе которой СУБД РВ выполняет группу последовательных операций с содержимым БД.

В момент начальной настройки системы и ввода ее в эксплуатацию необходимо обучить сеть для распознавания контуров дефектов по первоначальным образцам в режиме тестового функционирования. В случае изменения режимов производства стекла необходимо проводить переобучение ИНС. Модуль ПЗМ3 обеспечивает выполнение ее обучения в

режиме настройки программного комплекса по алгоритму обратного распространения ошибки.

«Программа идентификации дефекта» П4 определяет тип дефекта на основе результатов работы программ П2 и П3, которые загружаются из БД РВ. Эта программа состоит из модулей П4М1 «Модуль обработки параметров яркости дефекта», П4М2 «Модуль идентификации дефекта» и П4М3 «Модуль формирования правил ЭС».

Модуль П4М1 считывает из БД РВ параметры яркости точечного дефекта и обрабатывает их, в результате определяется интенсивность пропускания светового потока ядром дефекта, используемая в качестве исходных данных для экспертной системы (ЭС) идентификации типа дефекта. Дополнительными данными являются: наличие искажений вокруг ядра, форма ядра, тип контура, размеры ядра (ширина, длина) и общие размеры дефекта.

Модуль П4М2 реализует ЭС продукционного типа [392, 393], функционирующую в режиме РВ. Для этого разработана специализированная оболочка ЭС на языке C++ в MS Visual Studio.

База знаний содержит 7 правил определения типов дефектов, на основе которых определяются типы дефектов, такие как пузырь, свиль, сульфатный пузырь, включение, матовость поверхности, капля олова и оксид олова. Результаты идентификации дефекта сохраняются в БД РВ. Для записи полной информации о выявленном дефекте в БД производства листового стекла системой управления БД РВ формируется транзакция. Полученная информация используется АРМами технолога и начальника производства, а также системой менеджмента качества (СМК) предприятия. В случае возникновения неизвестных ранее дефектов модуль П4М3 предоставляет в режиме настройки программного комплекса возможность редактирования и добавления правил в базу знаний ЭС.

«Программа управления подсветкой» П5 реализована на промышленном контроллере Simatic S7-1214 с помощью среды разработки

TIA Portal. Программа П5 состоит из модулей П5М1 «Модуль опроса датчиков», П5М2 «Модуль вычисления настроек» и П5М3 «Модуль управления яркостью». Модуль П5М1 в режиме реального времени считывает данные с датчиков освещенности и скорости движения ленты стекла и сравнивает их значения с заданными настройками. При получении сообщения от программы П1 при систематическом снижении яркости изображения или изменении цвета стекла модуль П5М2 вычисляет новые настройки для системы подсветки в режиме настройки программного комплекса. Модуль П5М3 управляет яркостью подсветки в автоматическом режиме в соответствии с заданными настройками [473].

Информационная модель программного обеспечения пакета прикладных программ автоматизированной системы идентификации точечных дефектов листового стекла.

Для разработки пакета прикладных программ автоматизированной системы идентификации точечных дефектов листового стекла спроектирована информационная модель программного обеспечения с применением технологии Harmony и программной среды IBM Rhapsody Modeler, которая обеспечивает автоматизацию моделирования, проектирования и тестирования программного обеспечения требуется решить следующие задачи:

1. Определить требования к автоматизированной системе идентификации точечных дефектов листового стекла и разработать диаграмму вариантов использования.
2. Разработать модель автоматизированной системы идентификации на основе диаграмм: структуры, последовательности и развертывания.
3. Изучить возможности генерации программного кода автоматизированной системы идентификации.

Конечным результатом исследовательских работ является автоматизированная система идентификации точечных дефектов листового стекла, построенная на основе программной модели, которая обеспечивает

адаптацию автоматизированной системы управления к новым требованиям функционирования производства.

Требования к автоматизированной системе идентификации точечных дефектов

Для устранения причин возникновения дефектов в листовом стекле автоматизированная система идентификации точечных дефектов должна в режиме реального времени находить эти дефекты и идентифицировать их тип. Автоматизированная система взаимодействует с датчиками, видеокамерами, системой резки листового стекла и базой данных (БД) производства листового стекла, а также с автоматизированным рабочим местом оператора и технолога.

Информация об обнаруженных дефектах в стекле помещается в локальную БД реального времени, реализованную на MySQL, используя драйвер ADO.NET. Неактуальная на текущий момент времени информация архивируется и сохраняется в SCADA-системе Trace Mode 6 в СУБД реального времени SIAD/SQL 6, которая оптимизирована на быструю запись и чтение больших объемов информации 24 часа в сутки. Эта информация используется системой менеджмента качества предприятия. Информация из БД реального времени SIAD/SQL 6 используется для определения линии разреза ленты стекла.

Разработка системы начинается с определения требований к ней. Для хранения сформулированных требований и их изменений в процессе разработки может использоваться программный пакет IBM DOORS. Полученные требования передаются в среду визуального моделирования IBM Rhapsody. Она обеспечивает модельно-управляемое проектирование (Model Driven Development) программного обеспечения для встраиваемых систем. Для построения программной модели автоматизированной системы идентификации точечных дефектов листового стекла в IBM Rhapsody разработаны следующие диаграммы: диаграмма прецедентов, структурная диаграмма, диаграмма последовательности и диаграмма состояний. При

разработке диаграмм классов, структуры и состояний выполняется автоматическая кодогенерация на C/C++.

Для обеспечения верификации и валидации модели IBM Rhapsody позволяет моделировать выполнение скомпилированный программный код, отображая на диаграммах конечных автоматов изменения состояний объектов и протоколируя обмен событиями между объектами в диаграмме последовательности. Полученные при моделировании диаграммы последовательности сравниваются с разработанными на этапе проектирования системы. Это позволяет выявить несоответствия исходным требованиям. IBM Rhapsody поддерживает инструменты конфигурационного управления (Subversion, CVS, Synergy и др.).

Для автоматизированной системы идентификации точечных дефектов листового стекла были определены следующие основные требования: 1) определение локализации на ленте стекла наиболее часто встречающихся типов дефектов размером более 0,5 мм, 2) распознавание типа точечного дефекта листового стекла, 3) отображение дефектов листового стекла на АРМ оператора, 4) интеграция с автоматизированной системой производства листового стекла SCADA-системой Trace Mode 6, 5) интеграция с системой резки листового стекла [490].

На основе анализа этих требований разработана диаграмма вариантов использования (рисунок 6.16). На диаграмме прямоугольником показаны рамки системы «System of identification defects glass». Варианты использования обозначены овалами. С системой взаимодействуют внешние системы – актеры. Актерами являются линейная видеокамера Linear_VideoCamera, система резки ленты стекла Glass_CuttingSystem, система менеджмента качества предприятия Quality_ManagementSystem, датчик скорости движения ленты стекла Sensors_, подсистема подсветки Lighting_System, АРМ оператора Workstation_Operator и АРМ технолога Workstation_Technologist.

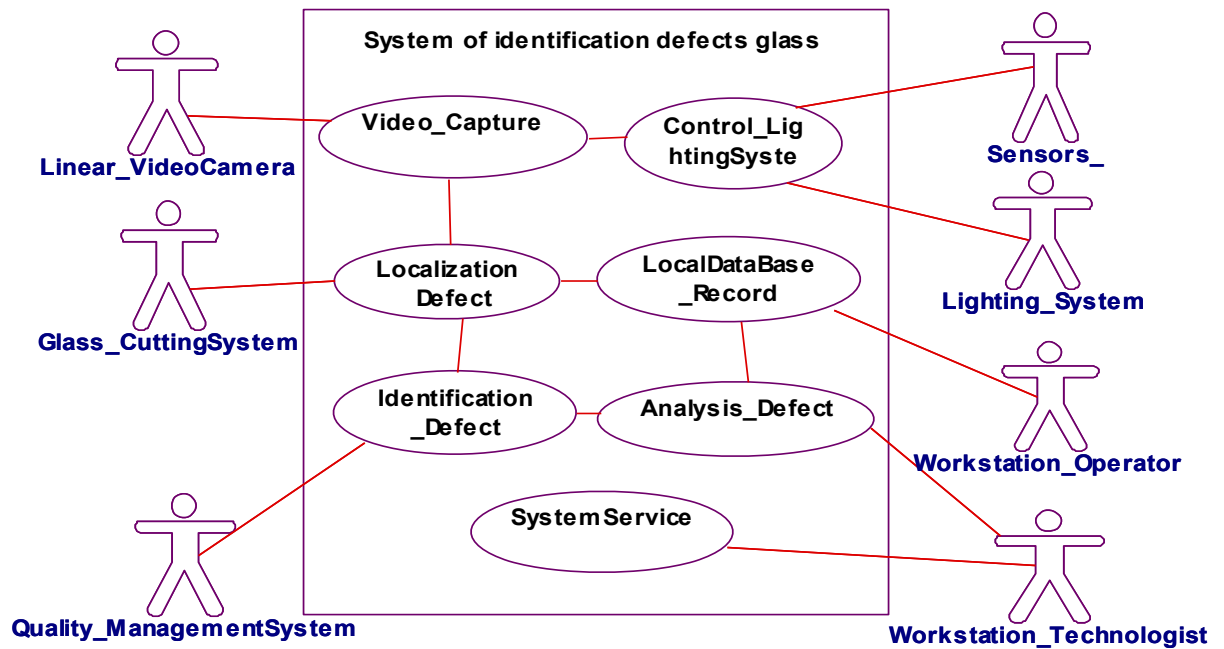


Рисунок 6.16 - Диаграмма вариантов использования

Вариант использования Video_Capture обеспечивает захват видеоизображения при взаимодействии с вариантом использования Control_LightingSystem, который управляет подсветкой ленты стекла. Полученные изображения обрабатываются вариантом использования Localization_Defect и определяются координаты дефекта в ленте стекла. Эти координаты передаются актеру Glass_CuttingSystem, выполняющему резку ленты стекла. Вариант использования Identification_Defect определяет тип дефекта стекла и передает об этом информацию системе менеджмента качества предприятия (актер Quality_ManagementSystem) и в вариант использования Analysis_Defect, который анализирует новый дефект с целью улучшения идентификации. Вариант использования LocalDataBase_Record формирует новые записи в локальной БД РВ. Вариант использования SystemService обеспечивает сервисное обслуживание и настройку системы.

В диаграмме вариантов использования для каждого варианта использования необходим алгоритм действий. Например, для варианта использования «Localization_Defect» должна выполняться локализация неоднородностей сигналов и формирование их контуров на основе вейвлет-преобразования сигнала: 1) поиск неоднородностей, 2) выявление точек

(номера пикселей) местоположения оптических искажений, 3) накопление точек контура, 4) вычисление геометрических характеристик контура дефекта. Для варианта использования «Localization_Defect» накапливаются данные о среднем значении яркости подсветки между точками контура: 1) классификации типа дефекта по контуру, 2) идентификация конкретного типа дефекта в данном классе по данным о среднем значении яркости между точками [473].

Разработка модели автоматизированной системы идентификации

Для программной реализации автоматизированной системы на основе диаграммы вариантов использования разработана диаграмма структуры (рисунок 6.17), которая позволяет наглядно представить структуру автоматизированной системы идентификации и сгенерировать программный код.

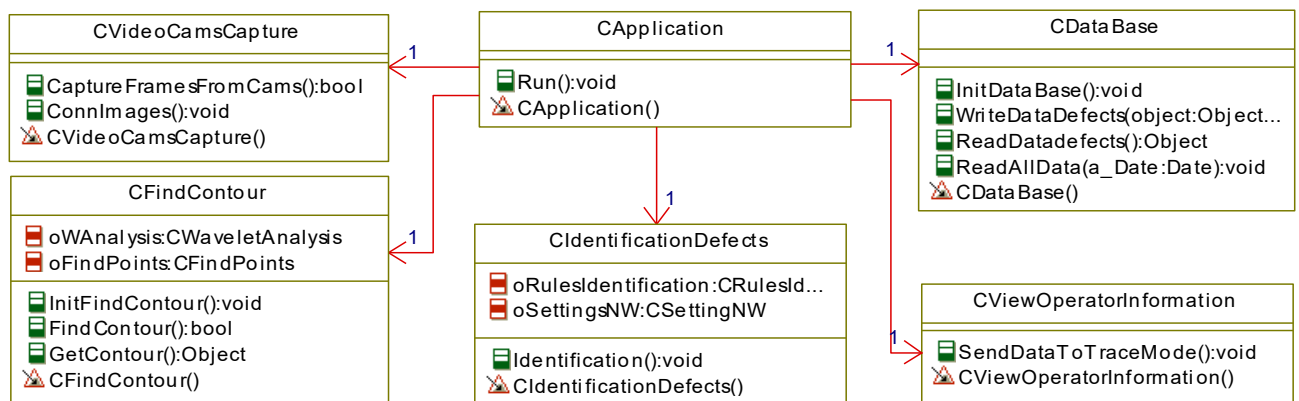


Рисунок 6.17 - Диаграмма структуры автоматизированной системы идентификации

Диаграмма структуры включает в себя следующие классы:

CApplication – класс, реализующий всю логику приложения;

CVideoCamsCapture – класс, реализующий алгоритм захвата изображений с видеокамер и захвата данных с датчиков;

CFindContour – класс, реализующий алгоритм локализации дефектов по изображениям, полученным с видеокамер;

CIdentificationDefects – класс, реализующий алгоритм идентификации выделенных дефектов;

CDataBase – класс, обеспечивающий взаимодействие с внутренней БД MySQL;

CViewOperatorInformation – класс, обеспечивающий подготовку данных для отображения информации о дефектах оператору через SCADA-систему Trace Mode 6.

Для определения методов классов с использованием информации из описания варианта использования «Localization_Defect» разработана диаграмма последовательности локализации дефекта, которая показана на рисунке 6.18.

Для автоматизированного обнаружения (локализации) и определения типа (идентификации) дефектов в листовом стекле на основе диаграммы классов реализованы модули, отвечающие за выполнение алгоритмов локализации, идентификации, взаимодействия с датчиками и камерами, архивирования, передачи данных в сеть и формирование данных для отображения на мониторе оператора и технолога [474].

Работа всех модулей синхронизируется по таймеру реального времени и по данным датчиков движения ленты стекла. Каждый такт срабатывания таймера опрашивается датчик движения ленты стекла. Он задает цикл опроса видеокамер, и сигналы, полученные с них, склеиваются в один. Итоговый сигнал отправляется в модуль локализации неоднородностей сигналов и формирования их контура. Развёртывание модулей показано на рисунке 6.19.

Компоненты автоматизированной системы разворачиваются на двух аппаратных платформах – промышленном компьютере PC_ и контроллере PLC_. Промышленный компьютер представлен отказоустойчивым двухпроцессорным сервером Fastwel AdvantiX IS-4U-SYS5, необходимым для обеспечения работы ресурсоемких приложений в условиях промышленного производства. Контроллер PLC_ реализован на базе программируемого логического контроллера Fastwel МК-905 с модулями ввода-вывода Fastwel IO [490].

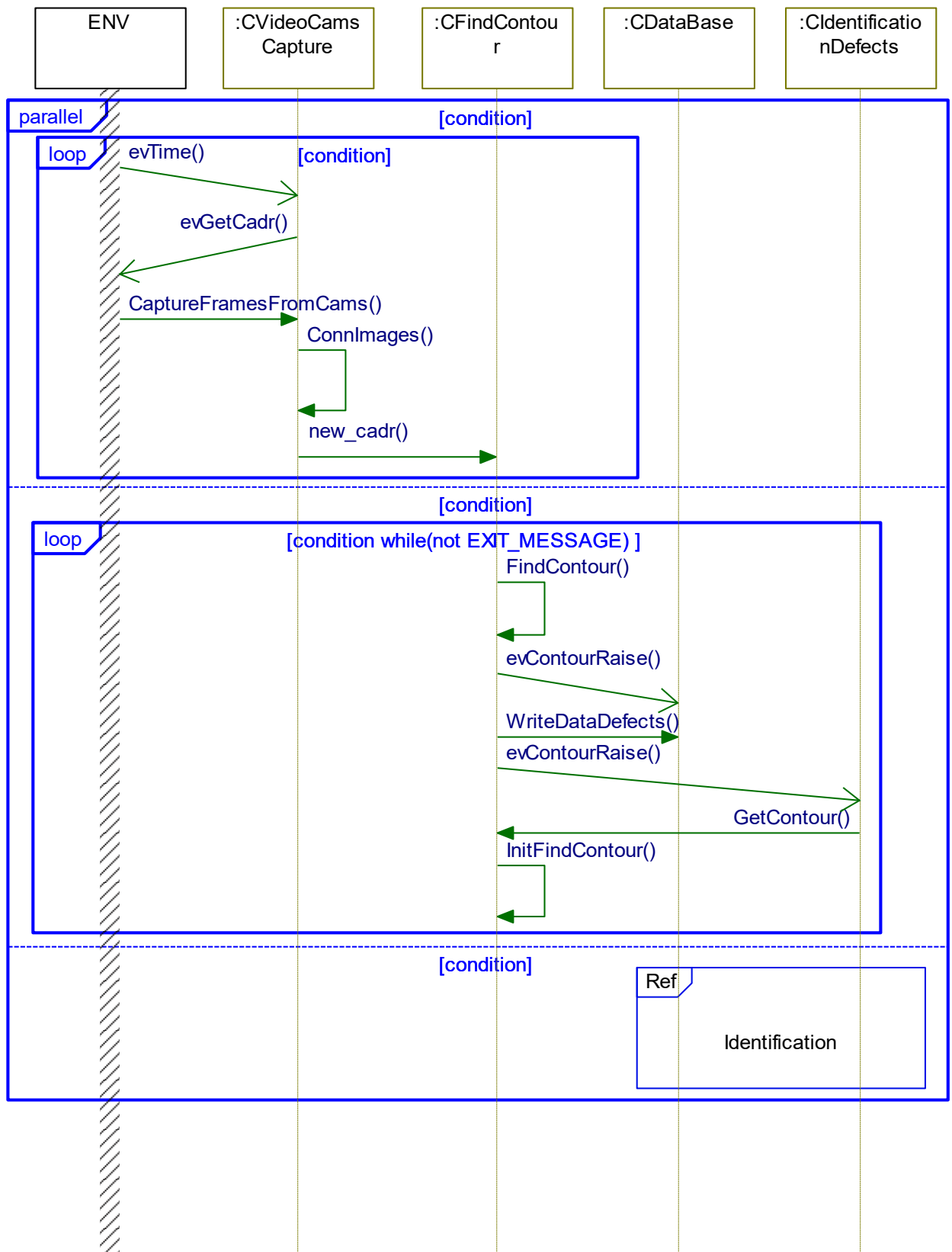


Рисунок 6.18 - Диаграмма последовательности локализации дефекта

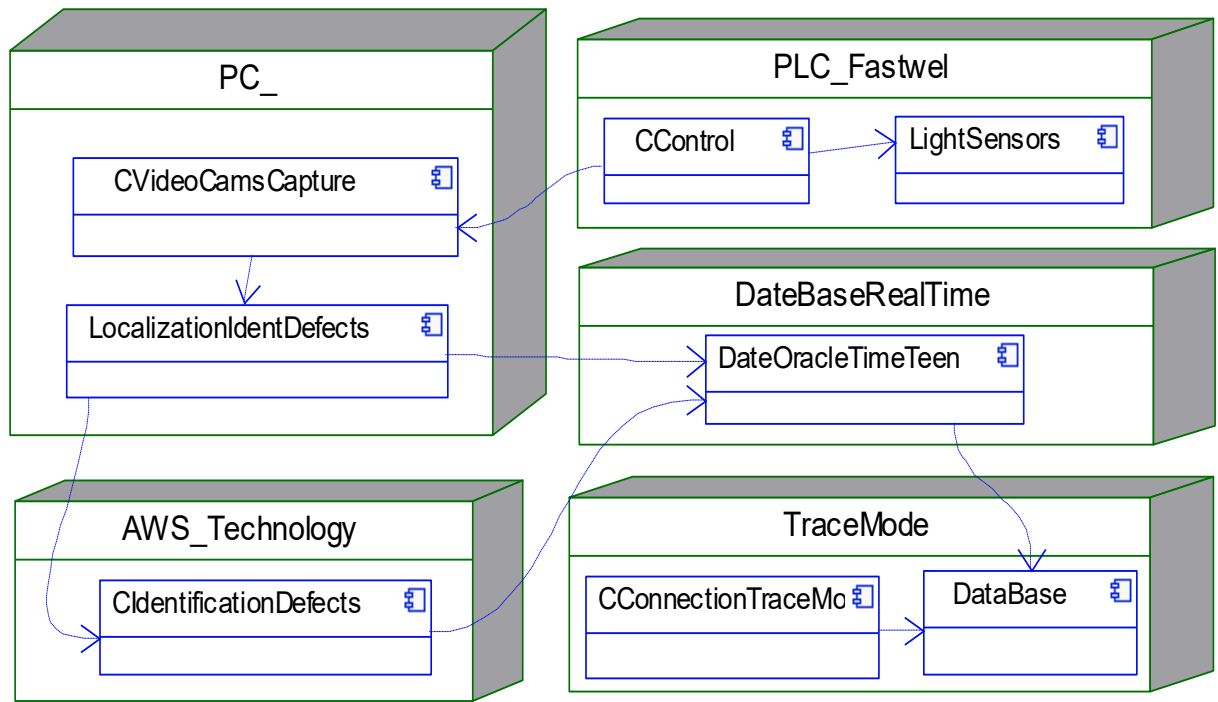


Рисунок 6.19 - Диаграмма развертывания автоматизированной системы

Возможности генерации программного кода

Применение модельно-управляемого проектирования в среде визуального моделирования IBM Rhapsody позволяет: 1) описать поведение системы в графических моделях; 2) исполнить графические модели и обнаружить ошибки не на этапе тестирования, а на этапах определения требований, разработки архитектуры и проектирования; 3) сгенерировать код приложения, который динамически связан с графической моделью; 4) обеспечить синхронизацию графической модели, программного кода и документации; 5) выполнить автоматическую генерацию тестов для тестирования автоматизированной системы идентификации.

Элементы модели объединяются в пакеты диаграммы развертывания для генерации кода компонентов программного обеспечения и определения их реализации в виде исполняемого файла или библиотеки. Генерация кода осуществляется в соответствии с настройками конфигурации. Для одной модели можно настроить несколько конфигураций генерации программного кода для исполнения: 1) на промышленном компьютере и анимированного исполнения во время отладки и тестирования, 2) в различных операционных

системах: Windows, VxWorks, QNX и др.[500]. Программный код может быть сгенерирован на языках программирования C, C++, Ada. Программное обеспечение автоматизированной системы идентификации сгенерировано на языке C++ в MS Visual Studio для операционной системы Windows.

Применение методики управления жизненным циклом программного обеспечения Harmony и среды визуального моделирования IBM Rhapsody повысило эффективность разработки автоматизированной системы идентификации точечных дефектов листового стекла.

Расширение функционала отечественных программных комплексов модельно-управляемого проектирования программного обеспечения UniMode, SimInTech и MASIW позволит обеспечить повышение производительности разработки и тестирования программного обеспечения для ответственных применений.

6.3. Архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ цифрового тренажера обучения операторов управлению химико-технологическим процессом формования листового стекла

Для обучения операторов управлению химико-технологическим процессом формования листового стекла разработан цифровой тренажер. Тренажер обеспечивает следующие основные функции: обучение; тестирование операторов; ведение базы данных персонала; составление отчетов по результатам тестирования; редактирование базы данных по нештатным ситуациям на основе анализа опыта операторов [474].

На основе опроса экспертов и изучения научно-технической литературы [237, 318, 475] определены параметры штатных режимов и основные нештатные ситуации, возникающие при формовании ленты стекла флоат-методом в ванне с расплавом олова. Основные виды нештатных ситуаций: кратковременное, длительное и полное отключение электроэнергии; отключение подачи газа; прекращение подачи защитной атмосферы ванны с расплавом олова; отскок утоняющих (бортоформирующих) устройств; поломка

дозировочного и отсекающего шибера; отключение нагревателя; течь холодильника; налипание ленты стекла на бортоформующие ролики; залипание ленты под бортоформующими роликами; залипание стекломассы ко дну и краю ванны расплава; крупное включение по краю ленты и центру ленты; остановка лера печи отжига; камень в выработочном канале стекловаренной печи; нестабильное состояние лужи стекломассы.

Каждая нештатная ситуация описана как теоретико-множественная модель $E = \langle N, C, I, J, R, S \rangle$, где N – название аварийной ситуации, C – множество признаков аварийной ситуации, I – множество изображений пульта оператора, отображающих развитие этой аварийной ситуации с течением времени, J – общий вид ванны расплава, R – множество причин возникновения этой аварийной ситуации, S – последовательность действий операторов по ликвидации этой аварийной ситуации.

Для облегчения процессов обучения и аттестации операторов формования ленты стекла и упрощения интерфейса цифрового тренажера множество аварийных ситуаций разделено на подмножества (группы). Такое разделение проведено на основе кластерного анализа с использованием пакета прикладных программ NCSS и получено 5 кластеров (групп) нештатных ситуаций (см. таблицу 6.1).

Выполненный кластерный анализ нештатных ситуаций позволил выделить кластеры причин возникновения нештатных ситуаций:

1. прекращение подачи средств обеспечения формования листового стекла (электроэнергия, природный газ, вода, защитная атмосфера ванны с расплавом олова);
2. отказы устройств формования стекла;
3. прилипание стекла к ванне с расплавом олова;
4. инородные включения в разливе стекла;
5. нестабильное состояние разлива стекла.

Таблица 6.1 - Кластеры нештатных ситуаций

№ п/п	Название нештатной ситуации	№ кластера
1	Кратковременное отключение электроэнергии	1
2	Длительное отключение электроэнергии	1
3	Полное прекращение подачи электроэнергии	1
4	Отключение газа	1
5	Прекращение подачи защитной атмосферы ванны с расплавом олова	1
6	Отскок одного последнего бортоформующего ролика	2
7	Отскок одного не последнего бортоформующего ролика	2
8	Поломка дозирующего шибера	2
9	Поломка отсекающего шибера	2
10	Отключение нагревателя	2
11	Течь холодильника	2
12	Остановка лера печи отжига	2
13	Налипание ленты стекла на бортоформующий ролик	3
14	Залипание ленты под бортоформующий ролик	3
15	Залипание стекломассы ко дну	3
16	Залипание ленты стекла к окружке ванны	3
17	Крупное включение по краю ленты	4
18	Крупное включение по центру ленты	4
19	Камень в выработочном канале	4
20	Нестабильное состояние лужи	5

Разработаны логико-информационные модели бизнес-процессов в текущем состоянии (as is) в нотации Business Process Model and Notation (BPMN) 2.0. На рисунке 6.20. в нотации BPMN 2.0 показаны логико-информационные модели бизнес-процессов «Разработка тестов» и «Аттестация сотрудников». В этих бизнес-процессах на «Дорожках» показаны исполнители единиц деятельности: «Главный технолог»; «Эксперт-технолог»; «Администратор комплекса для аттестации»; «Кадровик»; «Оператор формования листового стекла». Бизнес-процессы взаимодействуют с базами данных: 1С.Кадры, АСУТП, «База тестов», «Результаты обучения». Стартовыми событиями являются: «Утверждение нового технического регламента», «Завершение разработки новых тестов», «Прием оператора формования листового стекла на работу», «Наступление срока переаттестации сотрудников».

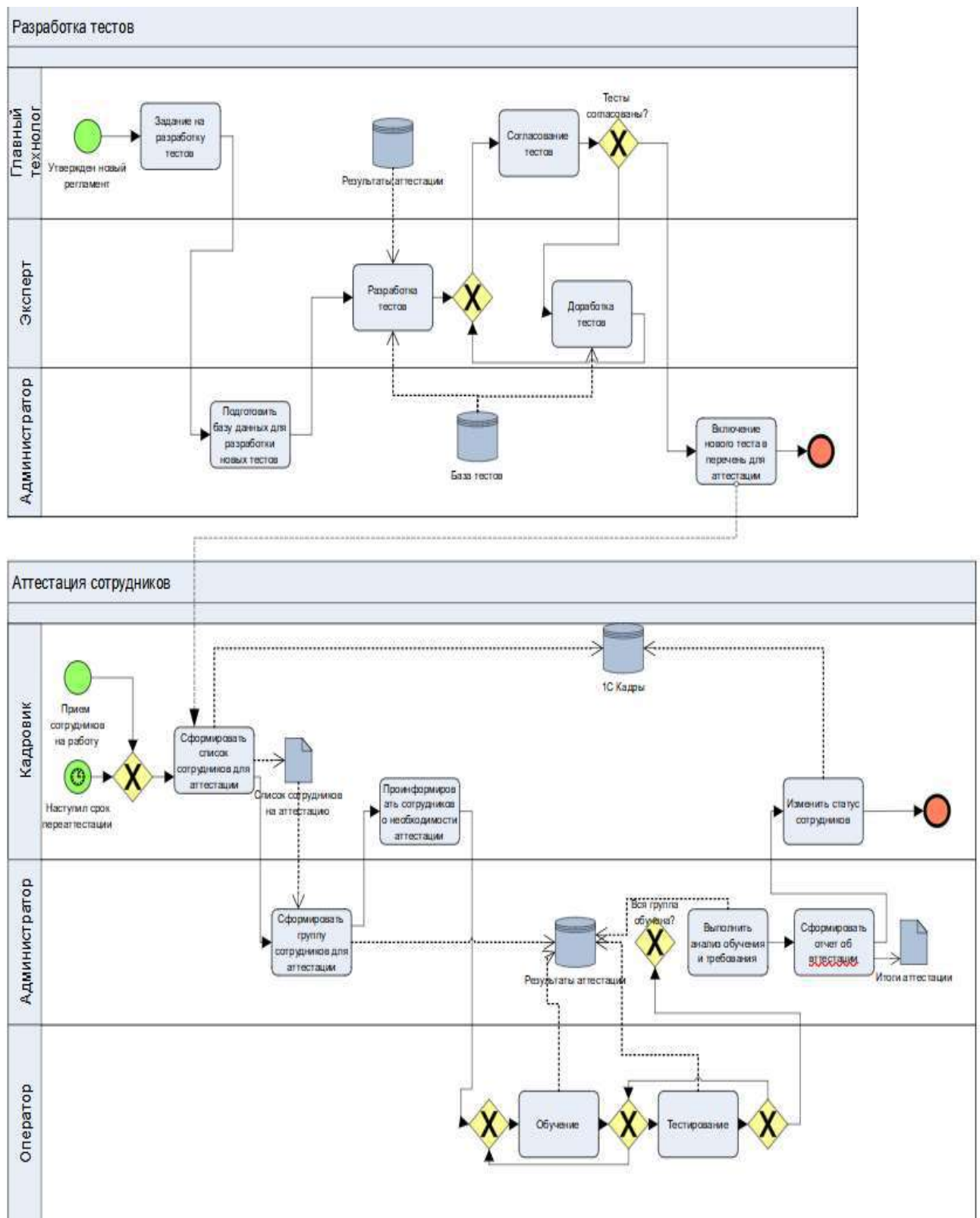


Рисунок 6.20 - Логико-информационные модели бизнес-процессов
«Разработка тестов» и «Аттестация сотрудников»

Анализ логико-информационной модели бизнес-процессов показал, что тренажер должен работать в 3-х режимах функционирования: «Оператор»; «Администратор»; «Эксперт». Выбор режима осуществляется на основе меню прав выбранного имени пользователя и пароля.

В режиме «Оператор» производится обучение операторов и их аттестация. Аттестация проводится двумя способами: 1) по изображению ситуации и ее описанию оператор должен определить: название ситуации, причины возникновения (для нештатных) и последовательность действий по переводу процесса в штатный режим; 2) для заданной ситуации определяется последовательность действий конкретного специалиста с учетом синхронизации по времени его действий с действиями других специалистов в данном технологическом процессе.

В режиме функционирования «Администратор» осуществляется ведение БД пользователей (обучаемый персонал), формирование отчетов по аттестации.

В режиме функционирования «Эксперт» выполняется заполнение и редактирование базы данных аварийных ситуаций, возникающих при формировании листового стекла методом флоат-процесса, с учетом изменения регламентов технологических процессов и анализа практического опыта действий по устранению нештатных ситуаций и дефектов.

При разработке программного обеспечения цифрового тренажера использована методика *model-based system engineering* (MBSE). Применение методики MBSE для разработки программного обеспечения позволяет: управлять требованиями, проектировать, анализировать, верифицировать и проводить валидацию на протяжении всего жизненного цикла [42]. Методика MBSE реализована в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на основе нотаций UML и SysML.

На основе анализа требований определены варианты использования цифрового тренажера для обучения: 1) разработка тестов, 2) база тестов, 3) редактирование тестов, 4) подготовка обучения и тестирования, 5) анализ

обучения и тестирования, 6) отчет об обучении и тестировании, 7) база обучения персонала, 8) обучение оператора, 9) тестирование оператора. С цифровым тренажером взаимодействуют «актеры»: оператор, эксперт, администратор, программное обеспечение 1С.Кадры и АСУТП.

На рисунке 6.21 показана диаграмма вариантов использования цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла.

На основе анализа диаграммы вариантов использования разработана структура классов цифрового тренажера: «Users» – обеспечивает хранение информации о пользователях; «Tests» – содержит информацию о тестах; «Test» – подкласс для одного теста; «Group» – обеспечивает управление пользователями; «Attestation» – обеспечивает процессы обучения и тестирования; «Create_test» – обеспечивает создание новых тестов. Диаграмма классов показана на рисунке 6.22. Для каждого пользователя определяются атрибуты: группа, имя, пароль, производство, технологический процесс и режим технологического процесса.



Рисунок 6.21 - Диаграмма вариантов использования цифрового тренажера операторов

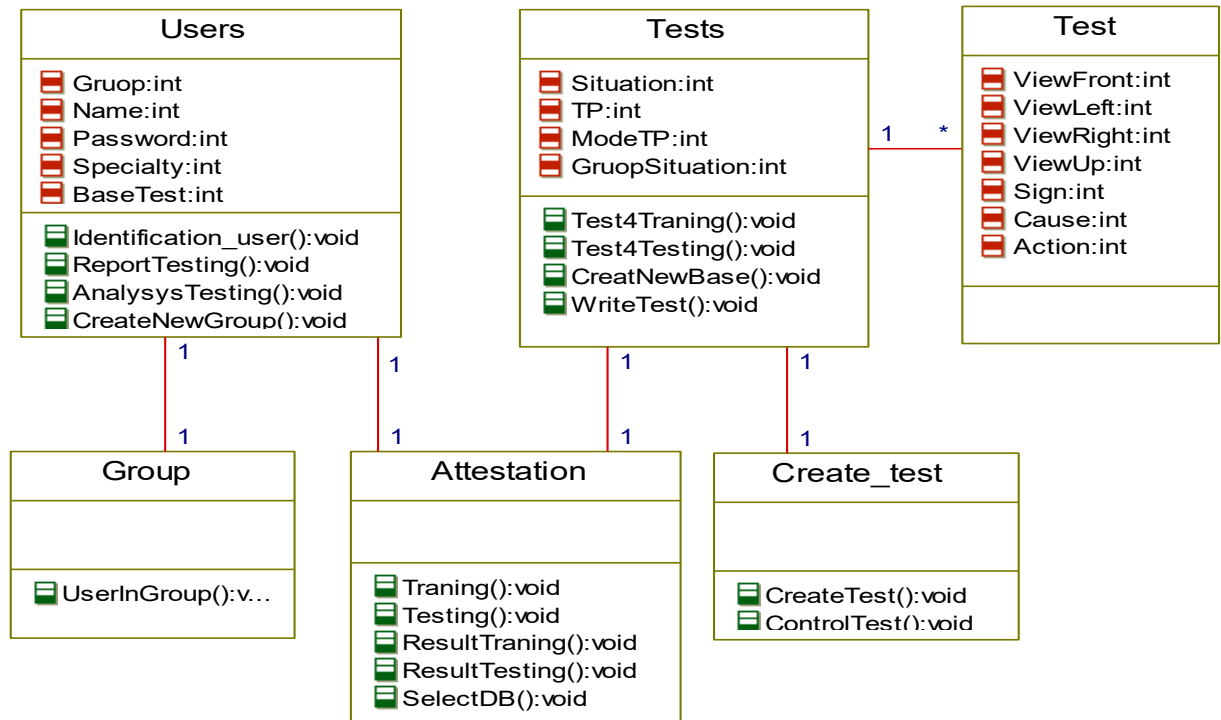


Рисунок 6.22 - Диаграмма классов цифрового тренажера

Для группировки ситуаций определены параметры: производство; технологический процесс; режим технологического процесса; группа ситуаций. Каждая нештатная ситуация в кластере описывается следующими характеристиками: 1) названием ситуации; 2) множеством признаков ситуации; 3) графическим изображением (рисунок, видеоролик, анимация) на пульте оператора и общего вида ТП, отображающих развитие этой ситуации во времени; 4) множеством причин возникновения этой ситуации; 5) последовательностью действий персонала по обработке этой ситуации, с учетом должностных обязанностей.

Структура функциональных подсистем цифрового тренажера представлена на рисунке 6.23, где сплошными стрелками показаны связи управления, а пунктирными стрелками информационные связи.

Цифровой тренажер реализован на языке PascalABC, а для хранения результатов использована текстовая база данных. В системе реализовано дерево развития ситуаций, которое обеспечивает дополнительный режим обучения, в котором могут быть объединены несколько последовательных аварийных ситуаций.

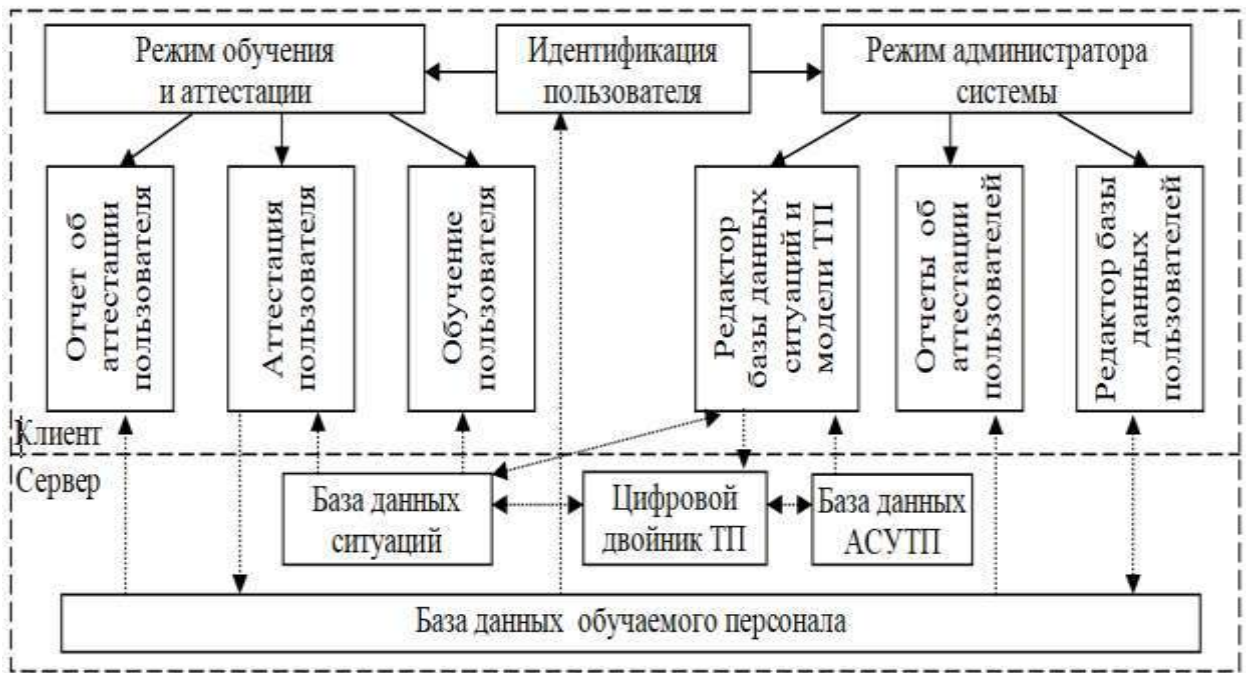


Рисунок 6.23. Структура функциональных подсистем цифрового тренажера

К производству листового стекла предъявляются жесткие требования к получению качественной продукции, при этом он характеризуется большим количеством нештатных ситуаций. Для управления таким сложным технологическим процессом необходимы квалифицированные операторы, которые могут идентифицировать нештатные ситуации по характерным признакам на ранних этапах их возникновения, понимать множество вызывающих их причин, выполнять регламентированные действия по их устранению.

Решение задачи обучения и аттестации операторов стекольного производства обеспечивает предложенный цифровой тренажер.

Цифровой тренажер обеспечивает добавление в качестве обучающего материала анимации и видеороликов. Это повышает наглядность процесса обучения и улучшает понимание ситуаций, возникающих в различных технологических процессах. Разработанный цифровой тренажер является компонентом внедряемой в настоящее время на предприятии единой информационной системы предприятия. Цифровой тренажер обеспечивает возможность его использования для повышения квалификации производственного персонала промышленных объектов аналогичного класса:

производство полимерной пленки, линолеума, бумаги и др. В процессе подготовки информации об аварийных ситуациях технологического процесса для наполнения базы данных цифрового тренажера специалисты предприятия решают главную цель – более полное понимание истинной причины возникновения ситуации, а значит и разработка новых менее затратных способов их устранения. Перспективным направлением развития цифрового тренажера является разработка функций экспертной системы реального времени и обеспечения поддержки принятия решений производственным персоналом.

6.4. Архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ управления планово-предупредительными ремонтами оборудования многостадийного производства высококачественного листового стекла

Высокоэффективное функционирование предприятий стекольной промышленности обеспечивается сокращением потерь и затрат на производство при повышении качества выпускаемой продукции. Потери при производстве листового стекла во многом связаны с возникновением аварийных ситуаций вследствие нарушения технологических режимов и отказов оборудования. Снижение отказов оборудования связано со своевременным проведением планово-предупредительных ремонтов и совершенствованием методов диагностики состояния оборудования для перехода с планово-предупредительных ремонтов по срокам на проведение ремонтов по состоянию оборудования. Издержки технического обслуживания и ремонта (ТОиР) минимизируют путем проведения различного вида ремонтных мероприятий, учитывающих нормативы и регламенты. Базируясь на подходах к планированию и исходя из параметров ремонтной программ, интерпретируют характеристики оборудования, как результат процесса ТОиР [423].

Одной из задач автоматизированных систем управления предприятием является управление планово-предупредительным ремонтом (ППР). Особенности этой задачи являются продолжительный срок решения в ручном варианте и большая нормативно-справочная база данных при сравнительно простом уровне вычислений. Одной из составных частей ППР оборудования является ППР энергетического оборудования. Анализ работы служб ОАО «Саратовстройстекло», связанных с задачами ППР, и литературы [476, 477] показал, что в связи с качественным изменением особенностей современного оборудования и развитием автоматизации управления им необходимо определить основные термины, используемые при решении задач ППР:

Агрегат – минимальная часть оборудования, для которой можно назначить, согласно нормативам, сроки и тип ремонта, имеет четыре основных типа.

Оборудование – совокупность агрегатов различных типов, объединенных территориально и с помощью различных связей (механических, электрических, трубопроводных, информационных) для выполнения определенной технологической операции или технологического процесса.

Агрегаты делятся на четыре типа (по названиям подразделений, которые выполняют их обслуживание и ремонт): механический, теплотехнический, электротехнический и АСУ ТП. В данной работе будем рассматривать только один тип агрегатов – электротехнический. Электротехнические агрегаты делятся на агрегаты, для которых изменение сроков ремонта в сторону увеличения недопустимо (высоковольтные) и для которых увеличение сроков допустимо.

Для решения задач ППР энергетического оборудования Институтом проблем точной механики и управления РАН разработана база данных и программного обеспечения, которое обеспечивает формирование годовых

смет на материалы, годовых и месячных графиков ППР, а также анализ качества работы оборудования.

Постановка в таком виде задач управления ППР показывает, что это задача является учетной, решаемой с периодичностью раз в один год. Задача такого класса не является задачей реального времени. Она может быть решена средствами систем управления баз данных, без использования систем реального времени. Поэтому, оптимальным средством разработки является предметно-ориентированная среда разработки 1С, которая работает в режиме интерпретации и исходный текст программы доступен для редактирования администратором системы, имеет встроенные процедуры восстановления базы данных при сбоях компьютера, удобный настраиваемый пользовательский интерфейс, встроенные процедуры тестирования и сигнализации об ошибках ввода информации пользователем, позволяет без изменений программы использовать ее в сетевом варианте.

Комплекс обеспечивает ведение следующих основных справочников: 1) дело агрегата; 2) план ремонтов агрегата; 3) выполненные ремонты агрегата, 4) классификаторы (нормативные справочники). Классификаторами являются: 1) нормативы ремонтосложности агрегатов; 2) структура условных единиц ремонтосложности; 3) ремонтные циклы агрегатов; 4) нормы на дежурное обслуживание агрегатов (оборудования); 5) нормы простоя агрегатов (машин) в ремонте; 6) нормы расхода основных материалов на ремонт агрегатов.

Результаты решения задач ППР оборудования представляются в виде следующих отчетов: 1) план график предупредительного ремонта годовой; 2) план график предупредительного ремонта на месяц; 3) расход материалов для проведения ППР.

Обобщенная информационная структура комплекса приведена на рисунке 6.24. Линиями со стрелками на рисунке 6.24 указаны информационные связи с подчиненными справочниками, а линиями без стрелок показаны связи между справочниками.

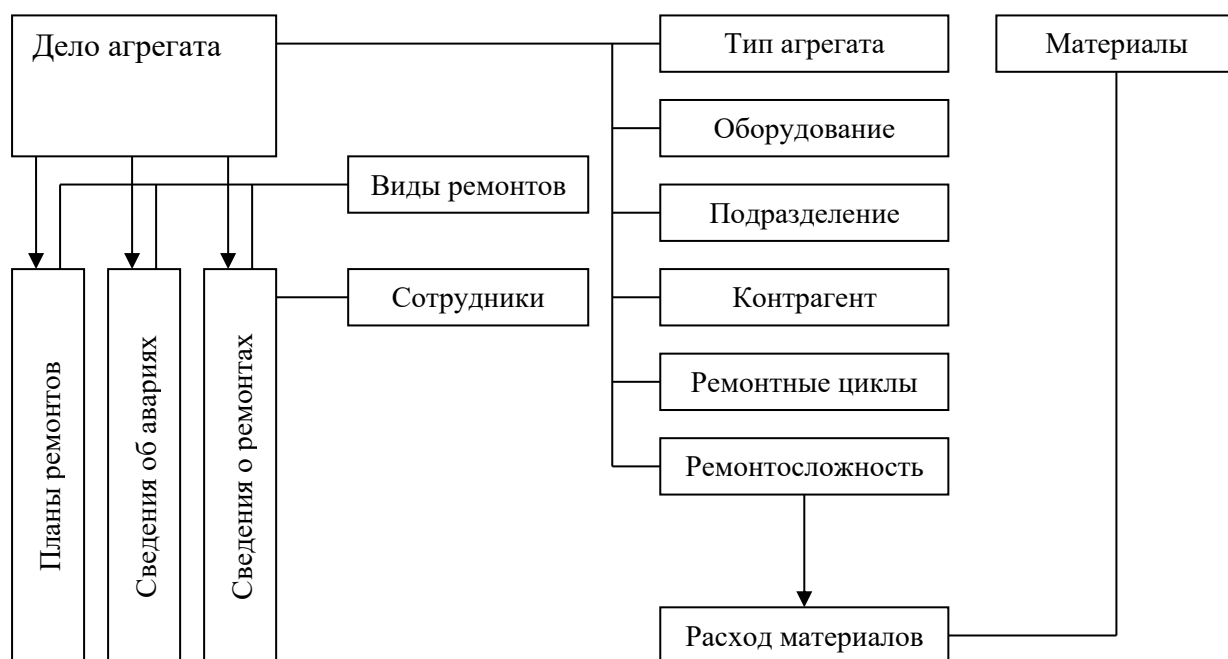


Рисунок 6.24 - Информационная структура системы управления ППР оборудования

Для расчета плана ремонта для всех агрегатов одного оборудования используется следующий алгоритм:

1. Определение стартовой даты для начала расчета графика ППР, исходя из трех условий: а) наличие последнего рассчитанного капитального ремонта, б) наличие последнего выполненного капитального ремонта, в) дата ввода агрегата в эксплуатацию.

2. Если оборудование, которому принадлежит агрегат, имеет приоритет «0» (не является оборудованием жизнеобеспечения или высоковольтным оборудованием), то для такого агрегата даты капитального, среднего, текущего ремонтов, насчитываются последовательно только на основе данных справочника Ремонтные циклы. Переход к пункту 5.

3. Если агрегат технологический (механический) и оборудование, которому принадлежит агрегат, имеет приоритет «1» (оборудование жизнеобеспечения или высоковольтное оборудование), то для такого агрегата даты капитального, среднего, текущего ремонтов, насчитываются

последовательно только на основе данных справочника Ремонтные циклы. Переход к пункту 5.

4. В случае, если агрегат энергетический или теплотехнический и оборудование, которому принадлежит агрегат имеет приоритет «1» (оборудование жизнеобеспечения или высоковольтное оборудование), то для такого агрегата даты капитального, среднего, текущего ремонтов насчитываются последовательно на основе данных справочника Ремонтные циклы, а затем автоматически перемещаются (выбор наиболее близких значений планов ремонтов технологического оборудования) до совпадения с датами ремонтов технологических (механических) агрегатов этого же оборудования. Технологические (механические) агрегаты ремонтируются чаще энергетических или теплотехнических. Переход к пункту 5.

5. Рассчитанные данные записываются в подчиненный каждому агрегату справочник «План ремонтов».

В системе предусмотрен перенос сроков ремонта с учетом производственной необходимости и формирование графиков ППР с учетом сроков ремонтов оборудования жизнеобеспечения. Общий вид интерфейса пользователя показан на рисунке 6.25.

В процессе разработки системы была проведена работа по формализации знаний специалистов ОАО «Саратовстройстекло» при решении задач управления ППР. Разработанная на основе этих знаний система управления ППР используется в отделе главного энергетика ОАО «Саратовстройстекло». Она обеспечивает формирование годовых смет на материалы, годовых и месячных графиков ППР, а также анализ качества работы оборудования [478].

1С:Предприятие - Учет пл-рем: (D:\1C_ALL\ППР\Январь\)

Файл Действия Операции Справочники Обработки Отчеты Настройка Сервис Окна Помощь

Справочник: Дело машины (агрегата) (03.02.04)

Дело машины (агрегата): Двигатель откатки АО 1,1/3000 (03.02.04)

Общие сведения | Дополнительные сведения | Наличие

Наименование: Двигатель откатки АО 1,1/3000 Инвентарный № 03969

Тип агрегата: 1,1/1000 Входит в состав оборудования: Стол съема стекла №3

Дата ввода в эксплуатацию: 01.01.80 Подразделение: Производство №55

Ремонтосложность механ.ч.: 0 Сменность работы: Три

Ремонтосложность электр.ч.: 1.3 Ремонтные циклы: Стол съема

Ремонтосложность: 0 Обслуживающее подразделение: Производство №55

Значения периодических реквизитов указаны на 03.02.2004

История

OK Записать Закрыть Сведения о ремонтах Сдвиги плана ремонтов План ремонтов на год

Код	Наименование	Тип агрегата
237	Вентилятор АО 1,1/3000	Оборудован
238	ПУ и ШУ	1,1/3000
239	Двигатель откатки АО 1,1/1000	Стол съема ст
240	Вентилятор АО 1,1/3000	ПУ
241	ПУ и ШУ	Стол съема ст
242	Двигатель откатки АО 1,1/3000	1,1/1000
	03969	Стол съема ст

Закладки по подразделением

Печать

Сведения о ремонтах | Сдвиги плана ремонтов | План ремонтов

Справочник: Дело маш... | Дело машины (агр...)

Для получения подсказки нажмите F1

NUM TA: 01.01.02 00:00:00 БИ: 1 квартал 2004 г. TP:

Рисунок 6.25 - Интерфейс пользователя

6.5. Выводы

Раздел 6.1. Предложена методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС. С применением диаграммы вариантов использования языка моделирования SysML определен функционал и требования к подсистемам информационной системы. Разработана архитектура информационной системы для управления жизненным циклом непрерывного технологического процесса.

Раздел 6.2. Разработана автоматизированная система идентификации точечных дефектов листового стекла, построенная на основе модельно-управляемого проектирования с применением UML и алгоритмов идентификации позволяет обеспечить идентификацию наиболее часто встречающихся типов дефектов листового стекла. На основе полученной информации формируется электронная карта дефектов, которая используется для автоматического раскрытия листового стекла в реальном времени. Наличие программной модели обеспечивает упрощение адаптации программного обеспечения автоматизированной системы идентификации точечных дефектов листового стекла к новым требованиям, которые возникают в процессе ее эксплуатации.

Раздел 6.3. Разработан цифровой тренажер для обучения операторов формования листового стекла действиям в нештатных ситуациях на основе комплексного использования подходов проектирования бизнес-процессов и разработки структуры обеспечения с использованием универсального языка моделирования SysML. Разработка логико-информационных моделей бизнес-процессов в программном комплексе Business Studio позволила описать взаимодействие участников процесса повышения квалификации. Эти модели в нотации BPMN 2.0 стали основой для разработки диаграммы вариантов использования в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на языке SysML. Структура описания ситуаций технологического процесса формования листового стекла обеспечивает разработку описания

технологических процессов варки стекла, отжига стекла и других процессов, необходимых для обучения персонала.

Раздел 6.4. Анализ ведения планово-предупредительных ремонтов ОАО «Саратовстройстекло» позволил формализовать знания специалистов предприятия. На основе этих знаний с использованием цифровой платформы «1С» разработан пакет прикладных программ автоматизированного управления планово-предупредительными ремонтами электрического оборудования. Пакет прикладных программ используется в отделе главного энергетика ОАО «Саратовстройстекло». Он обеспечивает анализ качества работы оборудования и формирование годовых смет на материалы, годовых и месячных графиков ППР.

ГЛАВА 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

7.1. Научно обоснованные рекомендации по оптимизации энергоресурсоэффективности многостадийного производства высококачественного листового стекла

Рассмотрим пример реализации алгоритма планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС, обеспечивающий повышение энергоресурсоэффективности производства на основе оптимизации размеров партий и количества изменений режимов производства, рассмотренный в разделе 5.4.

Этап 1. Кластерный анализ номенклатуры продукции многостадийного производства ВЛС по критериям толщина стекла, площадь листа стекла позволил выделить следующие типы листовых стекол: «Т1» – бесцветные стекла толщиной $3 \div 4$ мм площадью до 8,1855 м²; «Т2» – бесцветные стекла толщиной $3 \div 4$ мм площадью более 8,1855 м²; «Т3» – бесцветные стекла толщиной $5 \div 16$ мм; «Т4» – бесцветные стекла толщиной $1,4 \div 2,9$ мм. При рассмотрении дополнительных параметров листового стекла можно определить дополнительные типы.

Этап 2. На основе стратегической карты целей [445], разработанной в среде Business Studio, определены объекты системно-динамической модели типа «Накопитель»: S_1 – «Финансы предприятия» (определяет прибыль предприятия в рублях), S_2 – «Штатное состояние оборудования» (определяет долю оборудования в штатном состоянии как безразмерную единицу измерения в диапазоне от 0 до 1)), S_3 – «Аварийное состояние оборудования» (определяет долю оборудования в аварийном состоянии как безразмерную единицу измерения в диапазоне от 0 до 1)), S_4 – «Склад стеклобоя» (определяет массу стеклобоя на складе в тоннах), S_5 – «Производство шихты»

(определяет массу шихты в тоннах), S_6 – «Варка стекла» (определяет массу расплавленного стекла в тоннах), S_7 – «Формование стекла в ванне расплава» (определяет массу стекла в ванне расплава в тоннах), S_8 – «Склад стекла Т1» (определяет массу стекла Т1 на складе Т1 в тоннах), S_9 – «Склад стекла Т2» (определяет массу стекла Т2 на складе Т2 в тоннах), S_{10} – «Склад стекла Т3» (определяет массу стекла Т3 на складе Т3 в тоннах), S_{11} – «Склад стекла Т4» (определяет массу стекла Т4 на складе Т4 в тоннах).

Этап 3. Система дифференциальных уравнений, описывающая функционирование многостадийного производства ВЛС, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} dS_1/dt &= f_1(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) - f_2(v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, c_9) \\ dS_2/dt &= f_4(c_{25}, f_3) - f_3(v_{13}, c_8) \\ dS_3/dt &= f_3(v_{13}, c_8) - f_4(c_{25}, f_3) \\ dS_4/dt &= f_5(S_4) - f_6(S_4, v_{10}) + f_{11}(S_7, f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}, v_{14}) \\ dS_5/dt &= f_7(c_{11}, c_{12}, f_6) + f_6(S_4, c_{10}, c_{12}) - f_8(S_5) \\ dS_6/dt &= f_8(S_5) - f_9(S_6, c_{11}, c_{12}) - f_{10}(S_6, c_{12}) \\ dS_7/dt &= f_{10}(S_6, c_{12}) - f_{11}(S_7, f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}, v_{14}) - f_{12}(S_7, c_{13}) \\ &\quad - f_{13}(S_7, c_{14}) - f_{14}(S_7, c_{15}) - f_{15}(S_7, c_{16}) \\ dS_8/dt &= f_{12}(S_7, c_{13}) - f_{16}(S_8, c_{17}) \\ dS_9/dt &= f_{13}(S_7, c_{14}) - f_{17}(S_9, c_{18}) \\ dS_{10}/dt &= f_{14}(S_7, c_{15}) - f_{18}(S_{10}, c_{19}) \\ dS_{11}/dt &= f_{15}(S_7, c_{16}) - f_{19}(S_{11}, c_{20}) \end{aligned} \right.$$

где f_1 – функция потока «Доход»; f_2 – функция потока «Расход»; f_3 – функция потока «Износ оборудования»; f_4 – функция потока «Обслуживание оборудования»; f_5 – функция потока «Поставка стеклобоя»; f_6 – функция потока «Загрузка стеклобоя»; f_7 – функция потока «Поставка сырьевых материалов»; f_8 – поток «Загрузка шихты»; f_9 – функция потока «Угар сырья»; f_{10} – функция потока «Произведенное стекло»; f_{11} – функция потока «Контроль качества»; $f_{12} \div f_{15}$ – функции потоков производства стекла типов «Т1-Т4», соответственно; $f_{16} \div f_{19}$ – функции потоков отгрузки стекла типов «Т1-Т4», соответственно; v_1 – переменная «Сумма продаж»; $v_2 \div v_5$ – переменные стоимость отгруженного стекла типов «Т1-Т4», соответственно; v_6 – переменная «Стоимость приобретенного стеклобоя в час»; v_7 – переменная

«Стоимость потребленной электроэнергии в час»; v_8 – переменная «Стоимость потребленного газа в час»; v_9 – переменная «Стоимость затраченного сырья в час»; v_{10} – переменная «Зарплата сотрудников в день»; v_{11} – переменная «Налоги в день»; v_{12} – переменная «Стоимость обслуживания оборудования в день»; v_{13} – переменная «Износ оборудования»; v_{14} – переменная «Брак стекла»; c_8 – константа «Процент износа оборудования»; c_9 – константа «Норма затрат на ремонт оборудования»; c_{10} – константа «Процент стеклобоя в шихте»; c_{11} – константа «Процент угара сырья»; c_{12} – константа «Масса съёма стекла в час»; $c_{13} \div c_{16}$ – константы нормы съёма в час стекла типов «Т1-Т4», соответственно; $c_{17} \div c_{20}$ – константы массы заказов стекла типов «Т1-Т4», соответственно; $c_{21} \div c_{24}$ – константы цен за тонну стекла типов «Т1-Т4»; соответственно; c_{25} – константа «Норма времени на ремонт оборудования». Начальные условия, определяющие состояние производственной системы в момент времени начала моделирования, задаются начальными значениями: $S_1 \div S_{11}$, $c_1 \div c_{24}$ [446].

Этап 4. Потоки, связывающие «Накопители», определяются функциями динамических переменных. На основе системы дифференциальных уравнений (5) в среде имитационного моделирования AnyLogic разработана СДМ многостадийного производства ВЛС (рисунок 7.1).

Этап 5. Переключение режимов производства ВЛС (функции потоков $f_{12} - f_{15}$) моделируется как агент «Производство» с различными состояниями. На рисунке 7.2 в МСА «Производство» определены 14 основных состояний производства ВЛС: 1) производство стекла равновесной толщины (Equilibrium), 2) плановое техническое обслуживание и ремонт оборудования (TORO), 3) четыре состояния производства стекла типов «Т1-Т4» (Do_Tx), 4) 4 состояния перехода в режим производства стекол типов «Т1-Т4» (toTx), 5) 4 состояния перехода из режима производства стекла типов «Т1-Т4» в режим производства стекла равновесной толщины (TxtoEq). В наименованиях



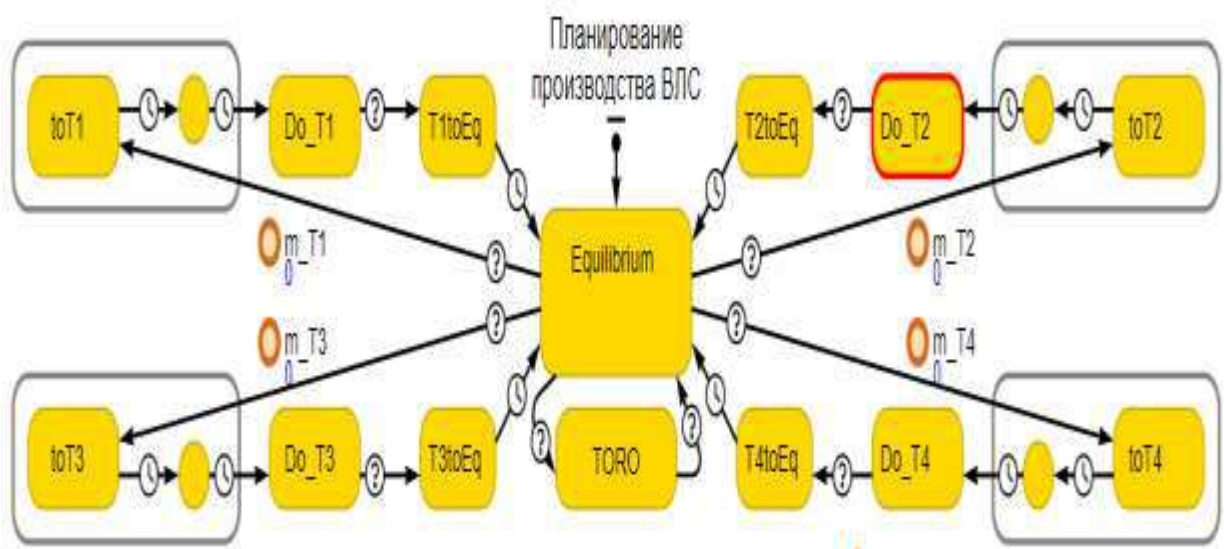


Рисунок 7.2 - Блок-схема модели состояний агента «Производство»

Этап 6. Для моделирования процессов формирования заданий на производство и отгрузки потребителям ВЛС разработана ДСММ, которая состоит из 4-х подсистем по числу рассматриваемых типов ВЛС (рисунок 7.3). Формирование заданий на производство каждого типа ВЛС выполняется на основе анализа заполненности склада и длины очереди запросов потребителей с учетом сезонной составляющей спроса на каждый тип ВЛС. В ДСММ выполнения заказов на каждый тип стекла («T1» – «T4») используются по 3 вида «заявок» (агентов, требований): «orderTx» – заказанное ВЛС, «planTx» – произведенное ВЛС, «shipTx» – отгруженное ВЛС. В наименованиях перечисленных «заявок» символ «x» принимает значения от 1 до 4, соответственно.

При завершении изготовления одного типа ВЛС в МСА (рисунок 7.2) выполняется проверка условия перехода в новое состояние. Если условие выполнено, например, для стекла типа «T1», осуществляется переход с состояние «toT1» и для источника «PlanT1» формируется партия заявок «planT1» размером «Size_Partiy_T1». Переход из состояния «toT1» в состояние «Do_T1» выполняется после завершения времени необходимого на обеспечение начала выпуска ВЛС типа «T1».

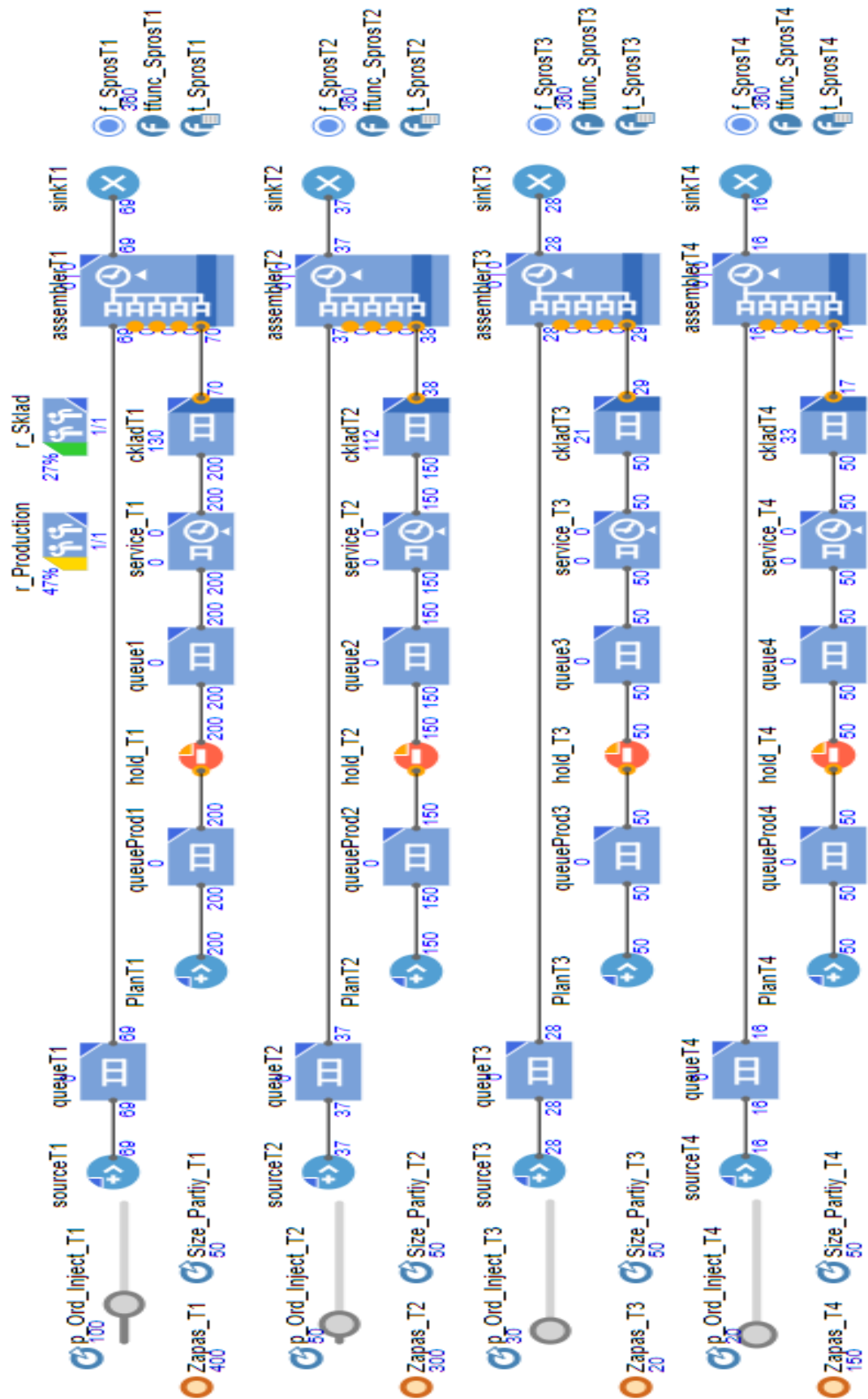


Рисунок 7.3 - Блок-схема дискретно-событийной многоагентной модели выполнения заказов

При этом объекту «Hold_T1» ДСММ (рисунок 7.3) посылается команда `hold_T1.unblock()` разблокировать и все заявки «planT1» из очереди «queueProd1» поступают в очередь «queue1» ДСММ. Далее заявки поступают на обработку в блок «service_T1» и накапливаются в очереди «skladT1» ДСММ. В блоке «assemblerT1» происходит объединение заявок «planT1» (произведенное ВЛС) и заявок «orderT1» (заказанное ВЛС) и формирование из них новой заявки «shipT1» (отгруженное ВЛС).

При входе в состояние «Do_T1» МСА выполняется блокировка объекта «Hold_T1» командой `hold_T1.block()` и устанавливается значение 0,87 динамической переменной «v_Work_T1» СДМ. Не нулевое значение переменной «v_Work_T1» открывает поток «f_Sem_T1» СДМ, который моделирует производство ВЛС типа «T1». Выход из состояния «Do_T1» МСА осуществляется при выполнении условия «`service_T1.size() <= 0`» – завершение изготовления партии заявок «planT1» размером «Size_Partiy_T1». В состоянии «T1toEq» выполняется переход из режима производства ВЛС типа «T1» в режим производства стекла разновесной толщины в течении заданного технологическим режимом времени. Аналогично реализуется имитационное моделирование для остальных типов ВЛС.

Этап 7. Дискретно-событийная многоагентная модель и модель состояний агента «Производство» дополняют системно-динамическую модель функционирования производства ВЛС. Эта комплексная компьютерная имитационная модель апробирована на статистических данных производств ВЛС. Динамические зависимости, полученные по результатам моделирования, показывают высокую объяснимость модели, коэффициент детерминации равен 95%.

Этап 8. В среде имитационного моделирования AnyLogic для выполнения экспериментов с комплексной компьютерной имитационной моделью многостадийного производства ВЛС для решения системы дифференциальных уравнений применяется метод Эйлера. В качестве

единицы модельного времени выбран период – час. Моделирование выполняется на интервале 1 год. В результате численных экспериментов с комплексной имитационной моделью получены графики динамики заполненности складов ВЛС различного типа (рисунок 7.4). Высокой энергоресурсоэффективности производства ВЛС соответствуют минимальные значения выпуска стеклобоя и его запаса.



Рисунок 7.4 - Заполненность складов ВЛС различного типа

В результате оптимизационных численных экспериментов с комплексной имитационной моделью получены значения размеров партий выпуска ВЛС различного типа для различных сочетаний производства типов ВЛС от 2 до 4. Оптимизируемым значением в численных экспериментах являлось минимальное значение заполненности склада стеклобоя, изменяемыми параметрами размер запаса и размер производственной партии по каждому типу стекла (Т1-Т4) (таблица 7.1). Для каждого типа стекла установлены одинаковые начальные значения для оптимизации: минимальный размер партии 0 тонн, максимальный размер партии 1000 тонн, минимальный размер запаса 0 тонн, максимальный размер запаса 4000 тонн. Спрос на каждый тип стекла задается функцией, которая учитывает влияние сезонности спроса на каждый тип продукции. В таблице 7.1 показаны значения

оптимизированных параметров, полученные при выполнении 500 итераций моделирования AnyLogic [491].

Таблица 7.1 - Результаты выполнения оптимизационных экспериментов

Тип стекла	T1	T2	T3	T4
Размер партии стекла, т	800	950	750	1000
Размер запаса стекла, т	3200	3200	4000	3900

В результате использования оптимизированных значений размера запаса и размера производственной партии по каждому типу стекла (T1-T4) в численных экспериментах с комплексной имитационной моделью получен график динамики заполненности склада стеклобоя (рисунок 7.5).

При одинаковых начальных условиях по спросу ВЛС уменьшение запасов стеклобоя в течение года на 16% (рисунок 7.5) выполнено с использованием оптимизированной программы управления производством, обеспечивающей сокращения времени переходов с одного на другой технологический режим. В период технологического перехода с одного технологического режима на другой затраты на компоненты стекольной шихты, природный газ и электричество сохраняются, а выпуск ВЛС не производится, поэтому сокращение времени таких переходов обеспечивает повышение энергоресурсоэффективности производства ВЛС.

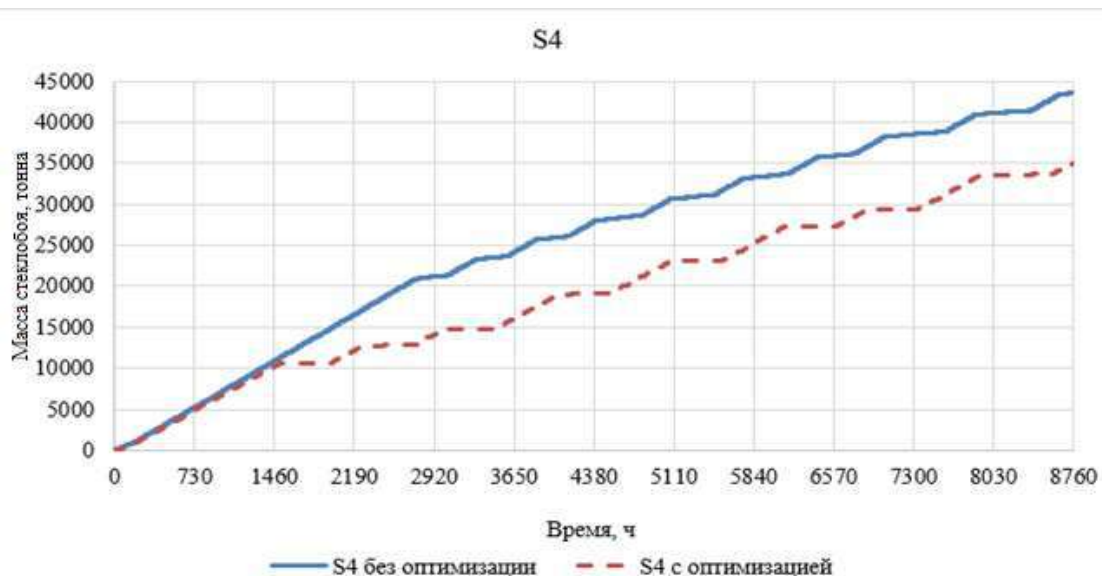


Рисунок 7.5 - График заполненности склада стеклобоя

В результате численных экспериментов с комплексной имитационной моделью с оптимизированными размерами производственных партии по каждому типу стекла (Т1-Т4) для различных сочетаний производства типов ВЛС от 2 до 4 получены графики энергоресурсоэффективности производства ВЛС (рисунок 7.6).

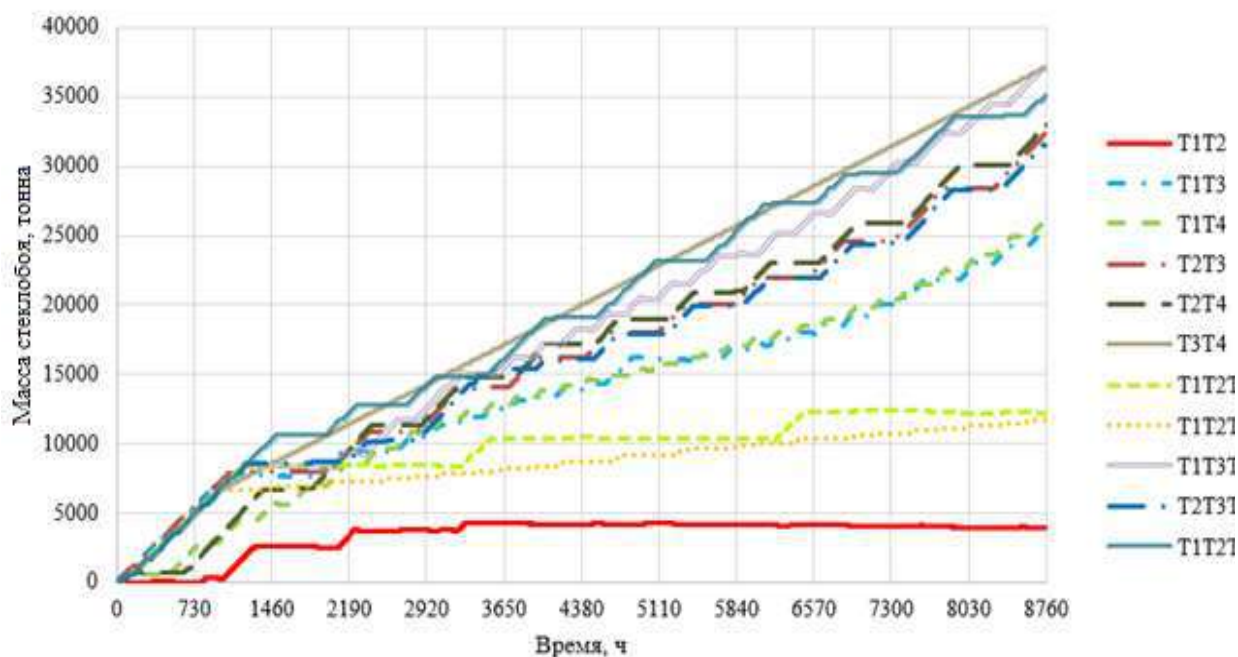


Рисунок 7.6 - График накопления стекlobоя при производстве различных типов ВЛС

Этап 9. Анализ графиков накопления стекlobоя при производстве различных типов ВЛС (рисунок 7.6) показывает, что наибольшей энергоресурсоэффективностью обладает программа производства типов стекла Т1 и Т2.

Результаты численных экспериментов показателей энергоресурсоэффективности многостадийного производства ВЛС на основе применения алгоритма оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС указанного производства хорошо согласуются с ретроспективными регламентными показателями с использованием метода наименьших квадратов существующих производств и качественно совпадают с многочисленными эмпирическими зависимостями [491].

7.2. Применение пакета прикладных программ автоматизированного управления составом стекольной шихты

Основной задачей современных стекольных производств является увеличение съема листового стекла и улучшение его качества. Поэтому при условии выполнения регламентных требований к качеству шихты необходимо наращивать объемы ее выпуска [240]. Для решения последней задачи требуется выявить резервы производительности оборудования и найти способы его оптимального использования.

Приготовление шихты происходит на дозировочно-смесительной линии (ДСЛ) под управлением автоматизированной системы в соответствии с рецептом и циклограммой (рисунок 7.7). К работе АСУ ТП ДСЛ предъявляются высокие требования к точности дозирования и качеству смешивания.

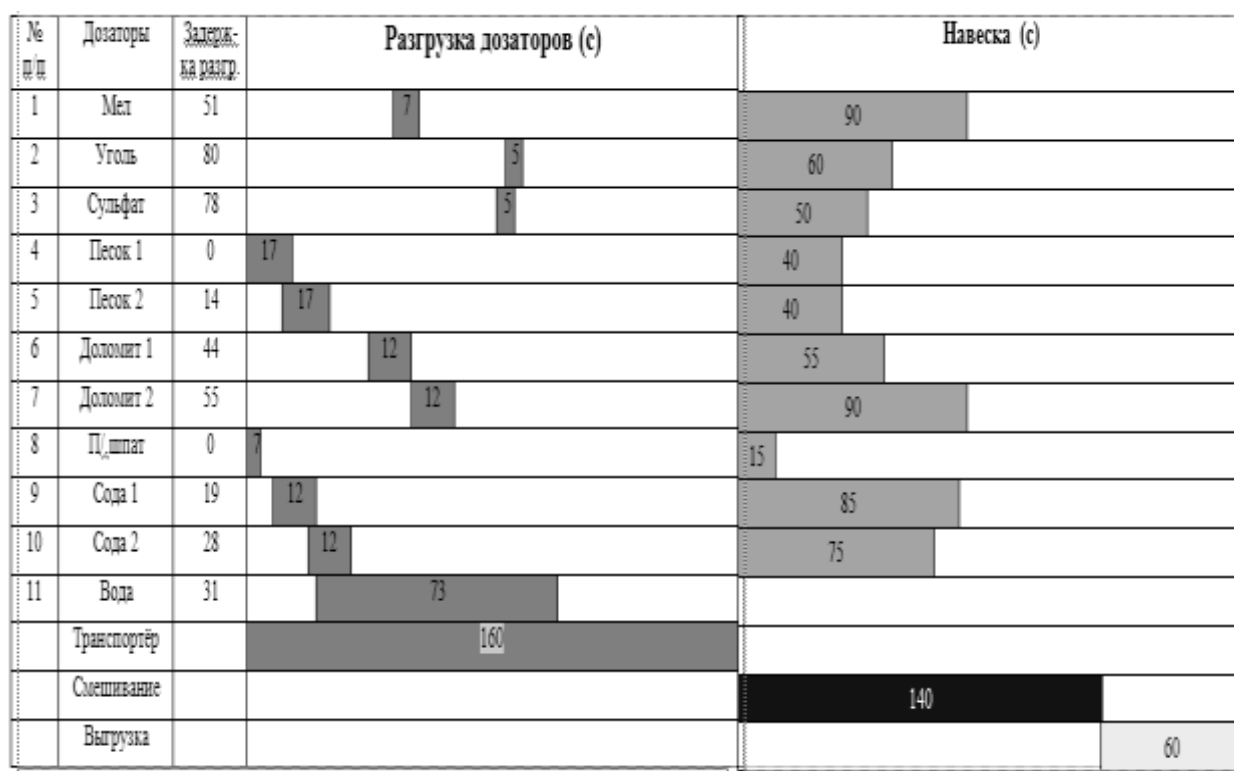


Рисунок 7.7. Циклограмма навески и разгрузки дозаторов

Приготовление шихты включает в себя: взвешивание доз сырьевых материалов, разгрузку компонентов шихты в определенной последовательности, транспортирование их в смеситель, увлажнение,

смешивание, контроль состава шихты и определение ее категории. Затем готовая шихта в зависимости от присвоенной категории выгружается из смесителя в один из бункеров накопителей. Далее шихта подается в загрузочный карман ванной печи, смешиваясь при этом со стеклобоем. Одновременно с выгрузкой шихты из смесителя начинается навеска следующей партии сырьевых материалов в дозаторы.

Для обеспечения соответствия режимов ТП показателям технологического регламента производства применены математические модели показателей качества шихты в виде ИНС, позволившие осуществлять непрерывный автоматический контроль качества шихты и вырабатывать своевременные управляющие воздействия [362]. Вследствие этого увеличился процент выпуска шихты первой категории, уменьшились средние и среднеквадратические отклонения по составу.

Для исследования возможностей существующего оборудования и выявления резервов его производительности применены методы имитационного моделирования в системе Tecnomatix Plant Simulation (TPS). Объектами моделирования являются бункера запаса и весовые дозаторы сырьевых материалов, бак запаса и насос воды, сборочный конвейер, смеситель [479, 480]. На основе циклограммы работы ДСЛ и нормативной документации определены характеристики модельных объектов. В TPS разработаны две имитационных модели ДСЛ с одним и двумя смесителями (рисунок 7.8).

В системе TPS предусмотрен обмен данными с помощью различных интерфейсов (ODBC, SQL, Excel, XML, ActiveX, OPC). Разработанная имитационная модель интегрирована с комплектом оборудования Simatic (контроллер с модулями ввода/вывода и программа управления ДСЛ) и единой информационно-аналитической системой (ЕИАС) предприятия. Предложенный программно-технический комплекс (ПТК), используя в качестве входных данных информацию о параметрах сырьевых материалов из ЕИАС, позволил промоделировать реальное производство шихты и получить статистику по времени работы оборудования, проверить и

улучшить алгоритмы управления качеством шихты, так как в ходе моделирования удалось выявить наиболее вероятные причины возникновения отклонений и определить способы их устранения [493].

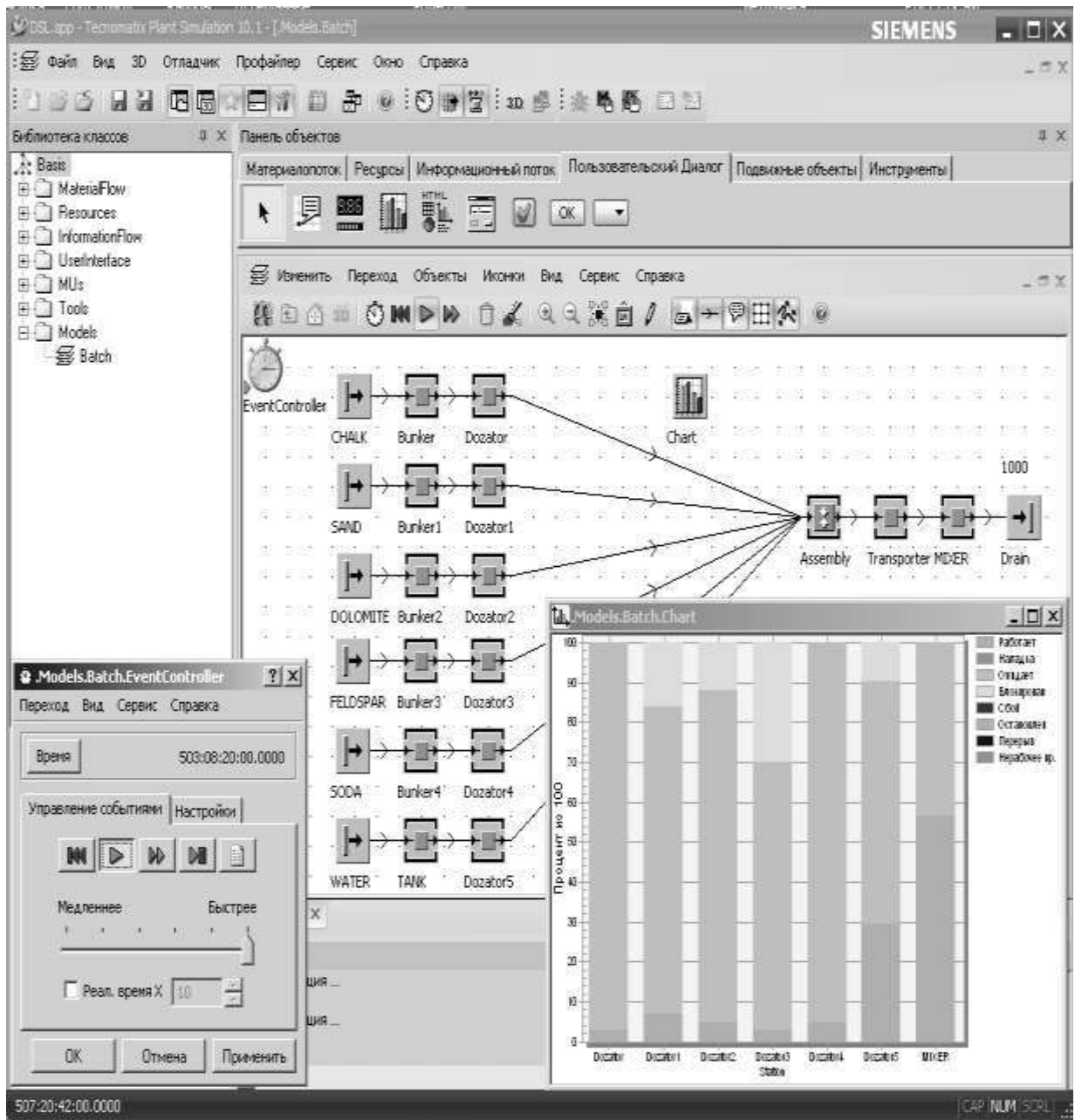


Рисунок 7.8. Результаты моделирования дозировочно смесительной линии

Ранее применявшиеся статистические методы анализа качества шихты позволяют выявить только сам факт возникновения отклонения без диагностики причины. Дальнейшее устранение отклонений дозирования зависело от опыта инженера и происходило на действующем оборудовании [480]. На рисунке 7.9 показана разработка АСУТП дозировочно смесительной линии на основе оборудования Simatic.

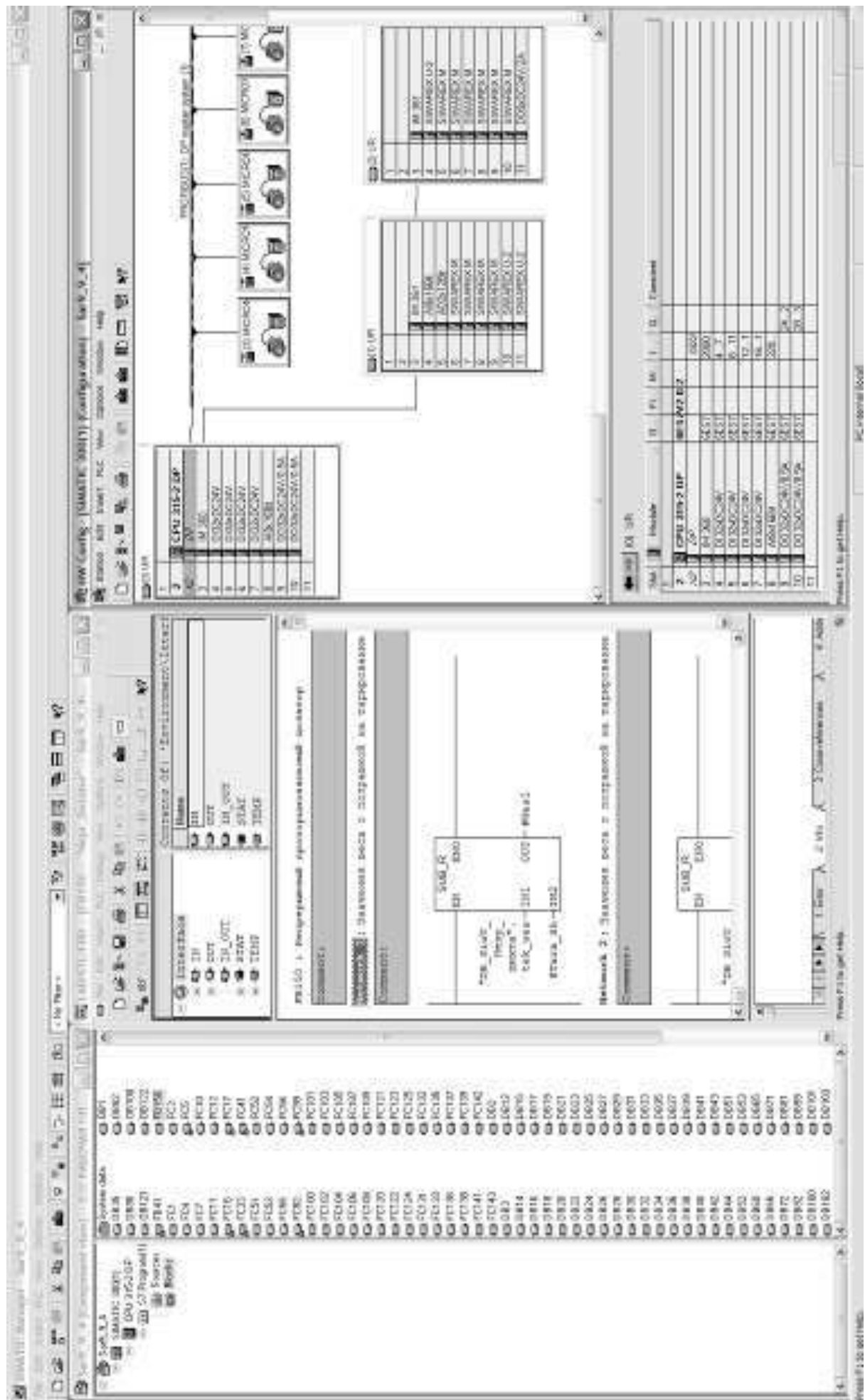


Рисунок 7.9 - АСУТП дозирования смесительной линии на основе оборудования Simatic

В результате проделанной работы разработана новая циклограмма работы ДСЛ, сократилось время на устранение отклонений по качеству шихты, повысился коэффициент использования оборудования, что в конечном итоге позволило увеличить производительность ДСЛ без снижения качества получаемой шихты. Предложенный подход может применяться при проектировании и разработке программ модернизации оборудования.

Разработанные в диссертационной работе нейросетевая модель и алгоритм автоматизированного управления составом стекольной шихты, а также реализующий их пакет прикладных программ, практически применялся в 2007 – 2010 гг. при эксплуатации единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло».

7.3. Научно обоснованные рекомендации по применению пакета прикладных программ диагностики дефектов листового стекла

Возникновение точечных дефектов в листовом стекле обусловлено нарушениями параметров технологического процесса на производстве. Определение дефектов в листовом стекле оператором «вручную», полагаясь только на свое зрение, может приводить к неточности определения дефектов и, как следствие, выходу бракованной продукции и последующих рекламаций. Поэтому, для повышения вероятности выявления бракованного стекла используются автоматизированные системы поиска дефектов [395]. Для построения причинно-следственных связей возникновения точечных дефектов в стекле нужна статистика обнаруженных типов дефектов. Каждый тип дефекта является результатом нарушения параметров технологического процесса [396].

Рассмотрим реализацию методики по идентификации точечного дефекта листового стекла типа «закрытый пузырь». На рисунке 7.10 а показано изображение дефекта и его сканирование линейной видеокамерой в дискретные моменты времени t_i , $i = \overline{1,5}$.

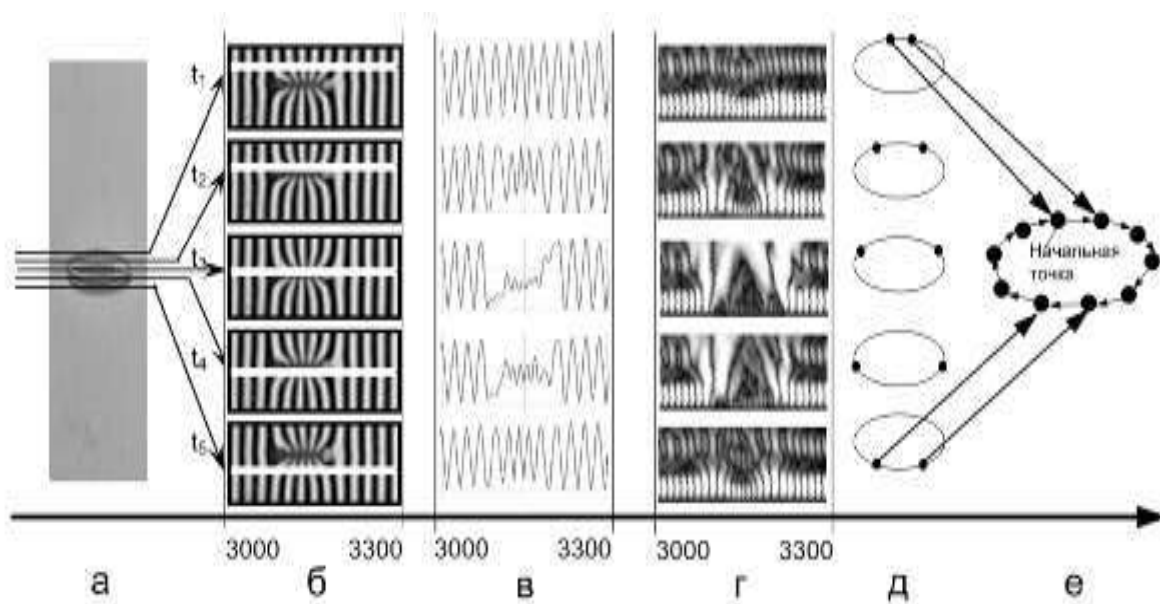


Рисунок 7.10 - Локализация дефекта в стекле в моменты времени $t_1 - t_5$

- (а) – изображение дефекта «закрытый пузырь», (б) – оптическое изображение искаженной дефектом структурированной подсветки;
 (в) – электрический сигнал с видеокамеры; (г) – вейвлет-преобразование электрического сигнала; (д) – выделенные точки контура дефекта,
 (е) – закодированный в векторной форме контур дефекта

Оптическое изображение искаженной дефектом структурированной подсветки в моменты времени t_i представлено на рисунке 7.10 б, где белая горизонтальная полоса обозначает участок сканирования. Результаты сканирования линейной видеокамерой в виде электрического сигнала представлены на рисунке 7.10 в. Затем сигнал преобразуется в цифровой код (16-битное значение яркости для каждого пикселя) и выполняется его вейвлет-преобразование (рисунок 7.10 г). Частотный анализ вейвлет-преобразования позволяет определить точки контура дефекта (рисунок 7.10 д), которые характеризуются яркостью и номером пикселя, соответствующего расположению оптических искажений в листовом стекле. Результаты сканирования в момент времени t_1 , характеризующиеся точками контура со значениями 3149 и 3156 пикселей, показаны на рисунке 7.10 д. Из множества

точек контура дефекта формируются элементарные вектора, в данном случае 10 векторов (рисунок 7.10 е).

Для определения типа контура дефекта эти 10 векторов преобразуются в 2048 скалярных значений по числу входов ИНС. В данном случае выходом ИНС является значение y_1 , соответствующее «гладкому контуру».

Эвристическая процедура выполняет анализ геометрических характеристик дефекта, типа его контура и яркости его точек на основе правил [392]. Эвристическое правило для данного дефекта:

ЕСЛИ (форма ядра = «круг» ИЛИ форма ядра = «овал») И тип контура = «гладкий контур» И (интенсивность пропускания светового потока ядром дефекта $> 90\%$ И интенсивность пропускания светового потока ядром дефекта $< 100\%$) И длина ядра $\geq$ ширины ядра И (наличие искажений вокруг ядра = *true* ИЛИ наличие искажений вокруг ядра = *false*), ТО дефект = «Закрытый пузырь».

К причинам возникновения дефекта «Закрытый пузырь» относятся: случайные изменения химического и гранулометрического состава сырьевых материалов, использование загрязненного стеклобоя, ошибки при составлении рецепта шихты, нарушение температурного режима варочной печи. Для определения наиболее вероятной причины этого дефекта экспертная система определения причин дефектов листового стекла анализирует технологические параметры из общезаводской БД.

Экспертная система реализована на языке программирования C++ в среде Visual Studio 2010. Результат работы экспертной системы отображается в главном окне системы контроля дефектов листового стекла (рисунок 7.11).

На рисунке 7.12 представлен редактор правил экспертной системы и обучения искусственной нейронной сети (ИНС). В момент конфигурирования системы дополняются правила, позволяющие на основе новых данных построить более точный классификатор дефектов или добавить правила классификации новых, неизвестных ранее дефектов листового стекла. В процессе конфигурирования система продолжает работать.

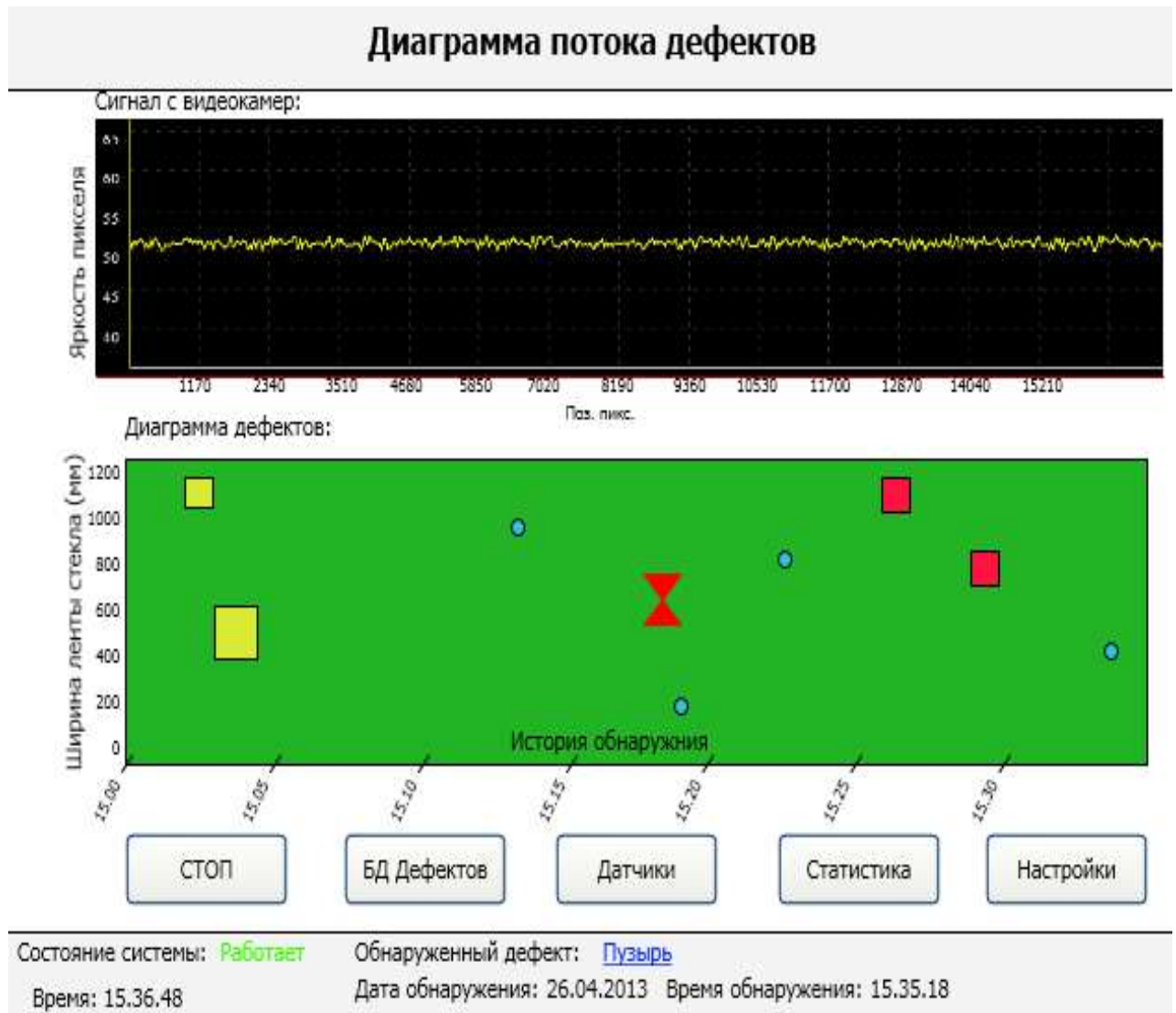


Рисунок 7.11 - Пользовательский интерфейс системы контроля дефектов стекла

При завершении конфигурирования система начинает работать с измененными данными, удаляя старые. Такая реализация экспертной системы позволяет на непрерывном производстве расширять базу знаний о дефектах, что делает систему более точной и универсальной.

Введение экспертной системы в систему контроля дефектов листового стекла позволит повысить эффективность выявления бракованного стекла и точность определения точечных дефектов листового стекла [392].

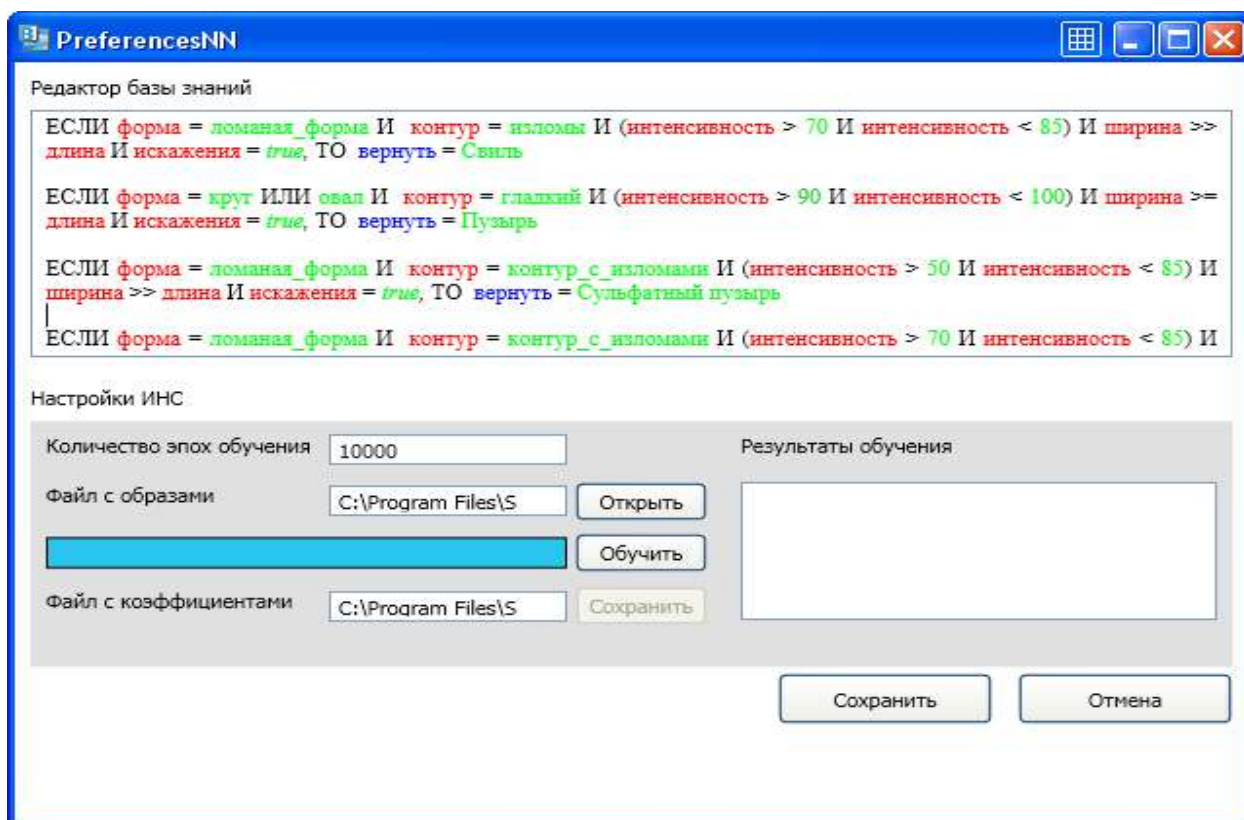


Рисунок 7.12 - Пользовательский интерфейс настройки экспертной системы и обучения ИНС

Проведена апробация прототипа разработанного аппаратурно-технического и программно-информационного обеспечения АС диагностики точечных дефектов ЛС для оценки её эффективности при идентификации пороков стекла на АО «Саратовский институт стекла» в 2015-2017 гг. В результате апробации установлено, что ППП АС диагностики точечных дефектов ЛС обеспечивал устойчивую диагностику только точечных типов дефектов листового стекла. Время локализации дефектов в кадре составляет от 0,1 до 1 с в зависимости от длины области дефекта, что в 20-200 раз меньше времени перемещения анализируемого участка ВЛС на участок резки. На решение задачи оптимизации раскроя ленты стекла с учетом производственного задания и размещения на ленте стекла выявленных дефектов требуется не более 5 с. Дальнейшее развитие ППП АС диагностики точечных дефектов ЛС обеспечит идентификацию и других наиболее часто встречающихся типов дефектов листового стекла.

7.4. Научно обоснованные рекомендации по оптимизации показателей надежности оборудования многостадийного производства высококачественного листового стекла

Исходными данными для логико-вероятностного алгоритма расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла выступают вероятности безотказного функционирования элементов производства в течение года без учета восстановления (таблица 7.2). Для их определения использованы интенсивности отказов технологического оборудования в течение года. Для данной структуры схемы функциональной целостности и исходных данных вероятность реализации принятого критерия составляет 0,614899, что соответствует интенсивности 0,4863 отказов в год. В таблице 7.2 также приведены значения положительного вклада элементов в обеспечение реализации критерия. Под значимостью элемента понимается коэффициент влияния его надежности на надежность системы в целом.

Положительный вклад предоставляет пользователю объективную количественную оценку мероприятий по изменению параметров отдельных элементов на реальную надежность и/или безопасность исследуемой системы в целом. Результат моделирования показывает положительные вклады элементов в вероятность реализации критерия (рисунок 7.13).

Анализ диаграммы положительных вкладов элементов показывает, что наиболее «узкими» местами системы являются элементы: 12 «Ванна расплава», 15 «Участок раскроя», 22 «Вентилятор студки», 28 «Транспортер ленты стекла». При повышении вероятности надежности функционирования этих элементов резервированием или изменением их конструкции до 0,9999, то вероятность реализации критерия возрастет на 0,15 (24%). В случае незапланированной остановки процесса варки-выработки листового стекла убытки составляют более 100 тыс. руб. в час.

Таблица 7.2 - Характеристики элементов системы

№	Наименование элемента	Вероятность безотказной работы за год	Интенсивнос ти отказов в год	Положител ьный вклад	Относительн ая стоимость элемента
1	Обеспечение электричеством	0,9999	1,000E-04	1,832E-07	0,030
2	Обеспечение водой	0,99	1,005E-02	0,0061665	0,010
3	Обеспечение газом	0,98	2,020E-02	0,012459	0,020
4	Обеспечение шихтой	0,99	1,005E-02	0,0061665	0,050
5	Обеспечение стеклбоем	0,98	2,020E-02	0,012459	0,010
11	Варочная печь	0,96	4,082E-02	0,025437	0,230
12	Ванна расплава	0,95	5,129E-02	0,032131	0,120
13	Печь отжига	0,97	3,046E-02	0,018881	0,030
14	Контроль качества	0,99	1,005E-02	0,0061665	0,050
15	Участок раскроя	0,95	5,129E-02	0,032131	0,040
16	Линия упаковки 1	0,94	6,187E-02	5,494E-06	0,050
17	Линия упаковки 2	0,94	6,187E-02	5,494E-06	0,050
18	Линия упаковки 3	0,95	5,129E-02	5,494E-06	0,040
19	Линия упаковки 4	0,95	5,129E-02	5,494E-06	0,040
20	Загрузчик шихты	0,9999	1,000E-04	6,105E-05	0,030
21	Холодильник пережима	0,999	1,001E-03	0,0006111	0,010
22	Вентилятор студки	0,95	5,129E-02	0,032131	0,005
23	Холодильники ванны расплава	0,9998	2,000E-04	0,0001221	0,010
24	Шиберы узла слива	0,9996	4,000E-04	0,0002443	0,005
25	Обеспечение защитной атмосферой	0,96	4,082E-02	0,025437	0,040
26	Электронагреватели	0,97	3,046E-02	0,018881	0,010
27	Растягивающие устройства	0,99907	9,300E-04	0,0005663	0,020
28	Транспортер ленты стекла (лер)	0,93	7,257E-02	0,045951	0,080
29	Вентиляторы печи отжига	0,95	5,129E-02	0,032131	0,010

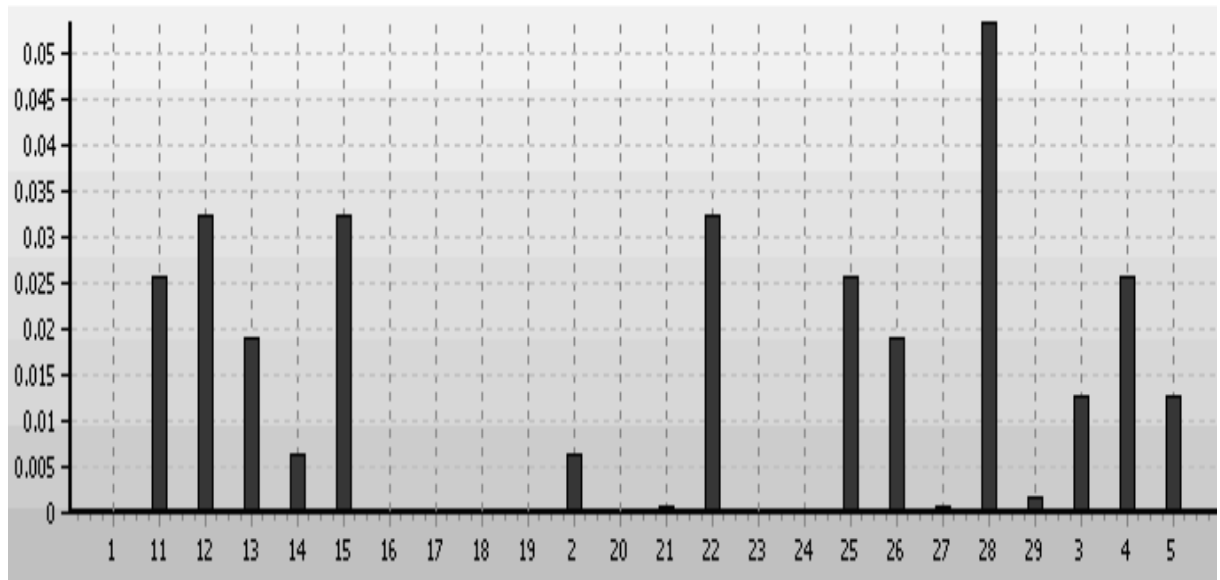
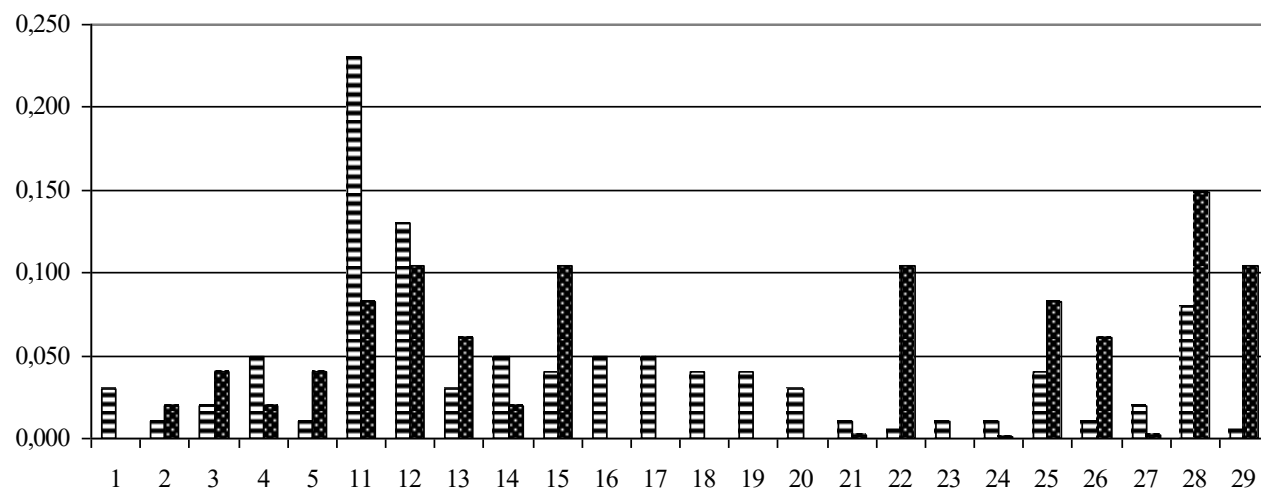


Рисунок 7.13 - Диаграмма положительных вкладов элементов

Затраты на мероприятия по повышению надежности функционирования для элементов 12, 15, 22 и 28 существенно различаются, поэтому для выбора первоочередных мероприятий необходимо проанализировать затраты на повышение надёжности каждого из них. Относительные затраты на резервирование элементов приведены в таблице 7.2. На рисунке 7.14 представлена диаграмма относительных затрат и нормированных положительных вкладов для всех элементов.

Анализ диаграммы показывает, что повышение надежности функционирования элементов 15 и 22 до 0,9999 обеспечивает увеличение вероятности реализации критерия «изготовление качественного стекла» на 0,06 (10%) при относительно небольших финансовых затратах (ориентировочно 1,8 млн. рублей).

Предложенный логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла позволяет на стадиях проектирования и модернизации определять и обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства листового стекла.



■ относительные затраты на резервирование ■ Нормированный положительный вклад в повышение надежности

Рисунок 7.14. Диаграмма затрат и положительных вкладов элементов

Применение логико-вероятностного алгоритма расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла позволяет получить исходные данные для оценки технических рисков и провести их оптимизацию с учетом определённых руководством предприятия критериев. Дополнительными критериями для определения первоочередных мероприятий по повышению надежности функционирования производства ВЛС являются: время выполнения; время простоя производства; изменение производительности после реализации мероприятий; изменение эксплуатационных расходов; сокращение убытков от простоя производства, связанных с отказом оборудования; повышение качества выпускаемой продукции; снижение технического риска [422].

7.5. Научно обоснованные рекомендации по применению цифрового тренажера для обучения операторов действиям в аварийных ситуациях

Разработанный ППП цифрового тренажера для обучения операторов действиям в аварийных ситуациях используется на АО «Саратовстекло». Он прошел долгий путь развития от «Компьютерного тренажера для обучения операторов в аварийных ситуациях» (2001) до «Программного обеспечения

для обучения персонала выполнению штатных операций в различных режимах при варке стекла и его формовании флоат способом и действиям по устранению нештатных ситуаций и дефектов стекла» (2006) и продолжает совершенствоваться [474].

Использование методики системотехники на основе модели «Model-based system engineering», реализованной в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на основе нотаций UML и SysML при разработке архитектуры и режимов функционирования ППП цифрового тренажера позволило упростить его модернизацию с учетом требований заказчика [484, 485].

Оператор обучается на основе последовательного изучения всех нештатных ситуаций, для каждой из которых демонстрируются изображения пульта оператора и общего вида ТП с развитием ситуации во времени (рисунок 7.15).

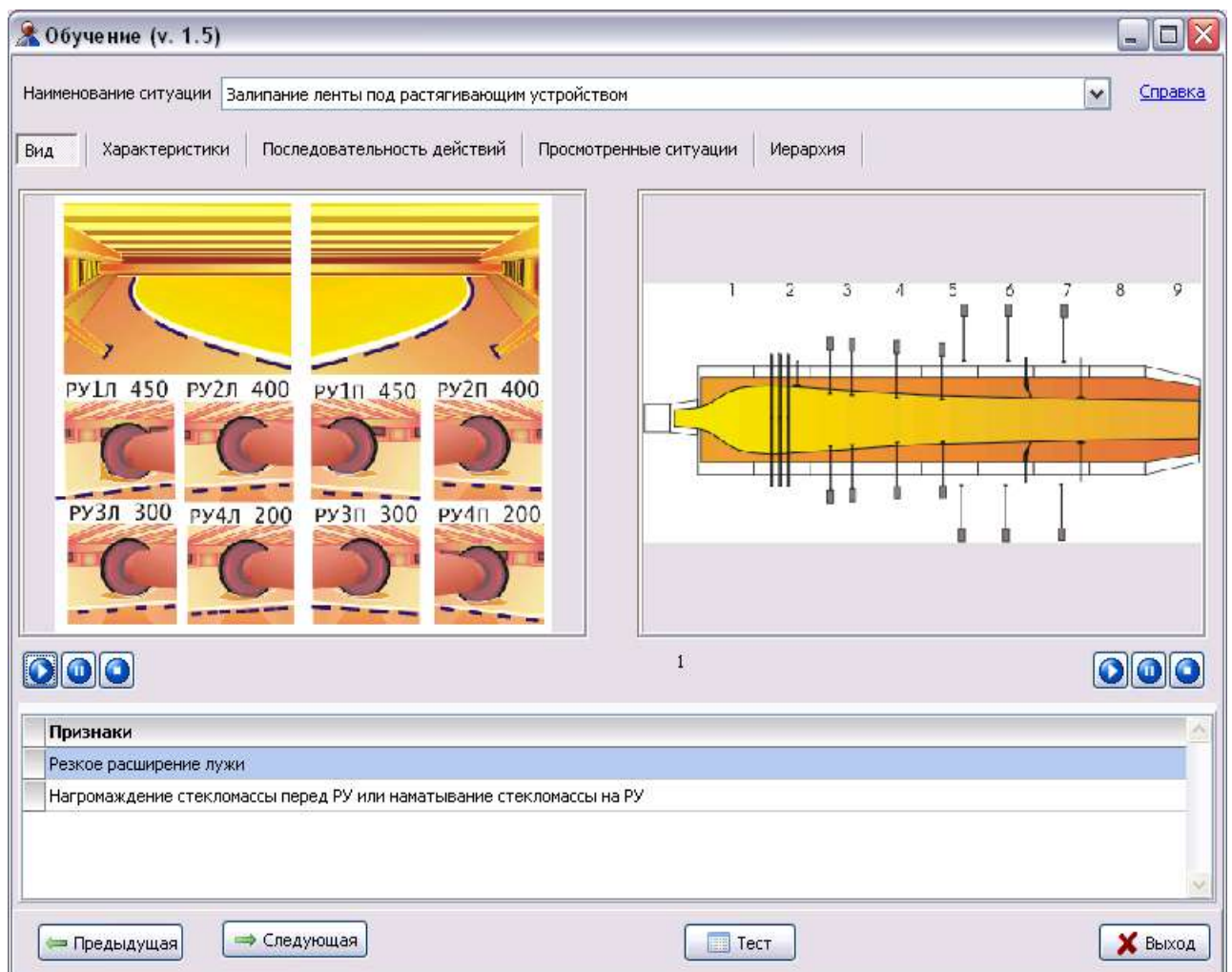


Рисунок 7.15 - Вкладка «Вид на пульте»

На рисунке 7.16 показан интерфейс пользователя цифрового тренажера, который демонстрирует список причин, признаков ситуации, действий по ее устранению.

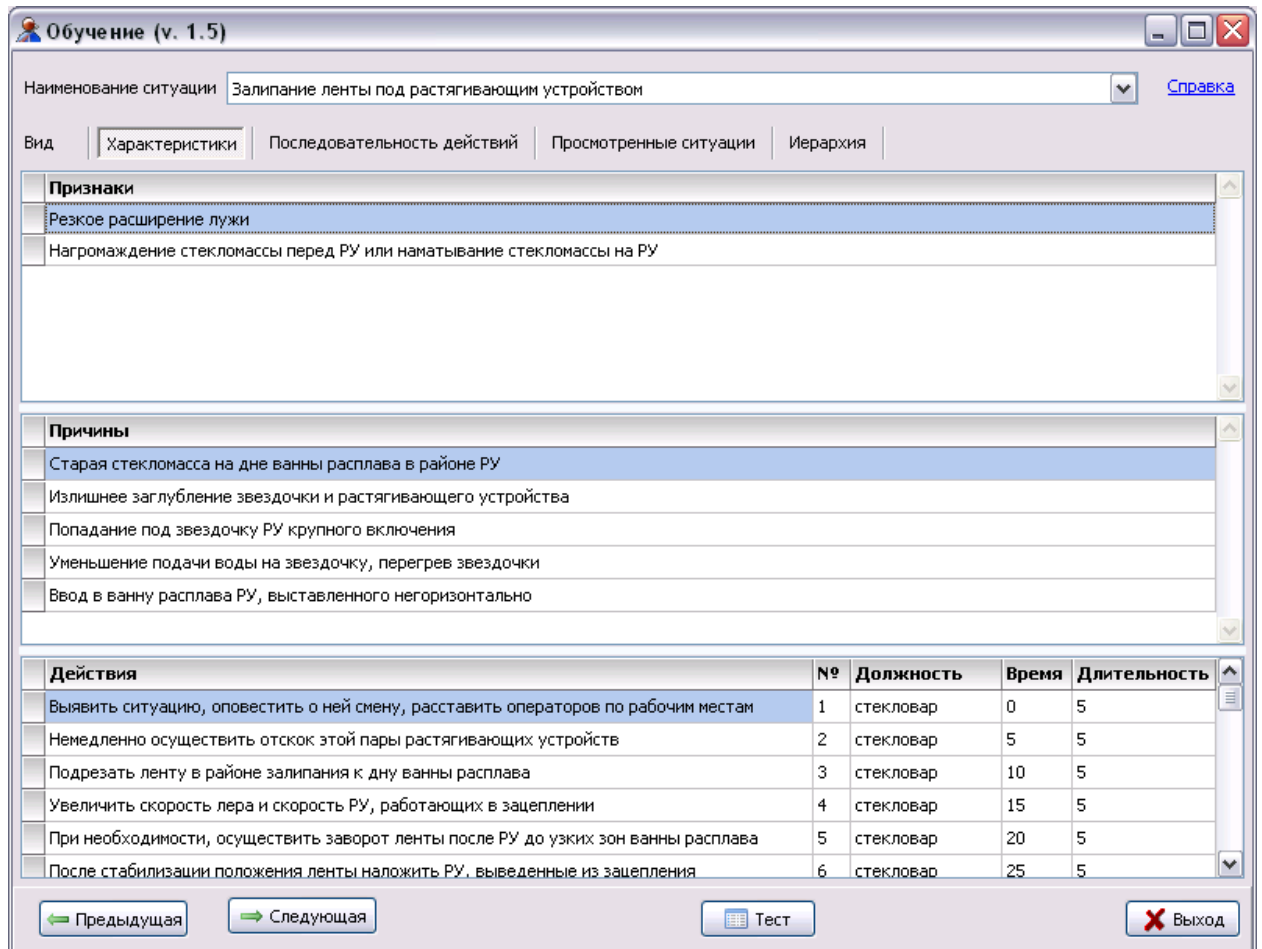


Рисунок 7.16 - Вкладка «Характеристики»

Пользовательский интерфейс с последовательностью действий специалистов, участвующих в заданной ситуации, с учетом синхронизации их действий по времени и длительности выполнения каждого действия показан на рисунке 7.17.

Тренажер осуществляет аттестацию операторов двумя способами: 1) по изображению ситуации и ее описанию определяет: название ситуации, причины возникновения (для нештатных) и последовательность действий по изменению ситуации; 2) для заданной ситуации определяется последовательность действий конкретного специалиста с учетом синхронизации по времени его действий с действиями других специалистов в данном ТП (рисунок 7.18).

Обучение (v. 1.5)

Наименование ситуации: [Справка](#)

Вид: ☒ Характеристики ☒ **Последовательность действий** ☐ Просмотренные ситуации ☐ Иерархия

	стекловар			
0	Выявить ситуацию, оповестить о ней смену, расставить операторов по рабочим местам			
5	Немедленно осуществить отскок этой пары растягивающих устройств			
10	Подрезать ленту в районе залипания к дну ванны расплава			
15	Увеличить скорость лера и скорость РУ, работающих в зацеплении			
20	При необходимости, осуществить заворот ленты после РУ до узких зон ванны расплава			
25	После стабилизации положения ленты наложить РУ, выведенные из зацепления			
30	Перейти на прежний установленный технологический режим выработки			

Рисунок 7.17 - Форма «Последовательность действий»

Тестирование (v. 1.5)

Кратковременное отключение электроэнергии (глубокая посадка)

Вид на пульте: ☐ Причины ☐ Действия ☒ **Последовательность действий** ☐ Результат

	Стекловар	Главный стекловар	Стеклодув	
0		Контролировать подачу воды на холодильники и РУ		
5	Если дозирующий шибер разрушен, то перейти на отсекающий шибер			
10		Выполнить действия при ситуации "Установка РУ на ленту стекла",		
15	В случае снижения подачи ЗА в в/р, ухудшения видимости в в/р			
20	Выявить ситуацию, оповестить о ней смену, расставить операторов			
25				
30				

[Подтвердить](#)

Действия	Профессия	Время	Длительность
Если дозирующий шибер разрушен, то перейти на отсекающий шибер	Стекловар	5	
Выполнить действия при ситуации "Установка РУ на ленту стекла", для пары Ру	Главный	5	
В случае снижения подачи ЗА в в/р, ухудшения видимости в в/р перейти на прямое вытягивание	Стекловар	10	
Выявить ситуацию, оповестить о ней смену, расставить операторов по рабочим местам	Стекловар	20	
Контролировать подачу воды на холодильники и РУ	Главный	30	

Рисунок 7.18 - Форма «Синхронизация действий»

При предотвращении аварийной ситуации или ликвидации ее последствий важную роль имеет своевременное воздействие на ТП каждого из должностных лиц. Оператор обязан знать последовательность и протяженность собственных действий и синхронизировать их с другими специалистами, работающими с данной нештатной ситуацией. Проконтролировать уровень знаний специалиста можно с использованием формы «Синхронизация действий» (рисунок 7.17). Из списка действий в нижней части вкладки необходимо выбрать истинные действия в правильной последовательности, своевременно и в соответствии с должностью [481 – 483].

Объединение ситуаций в группы и их иерархия показаны на рисунке 7.19.

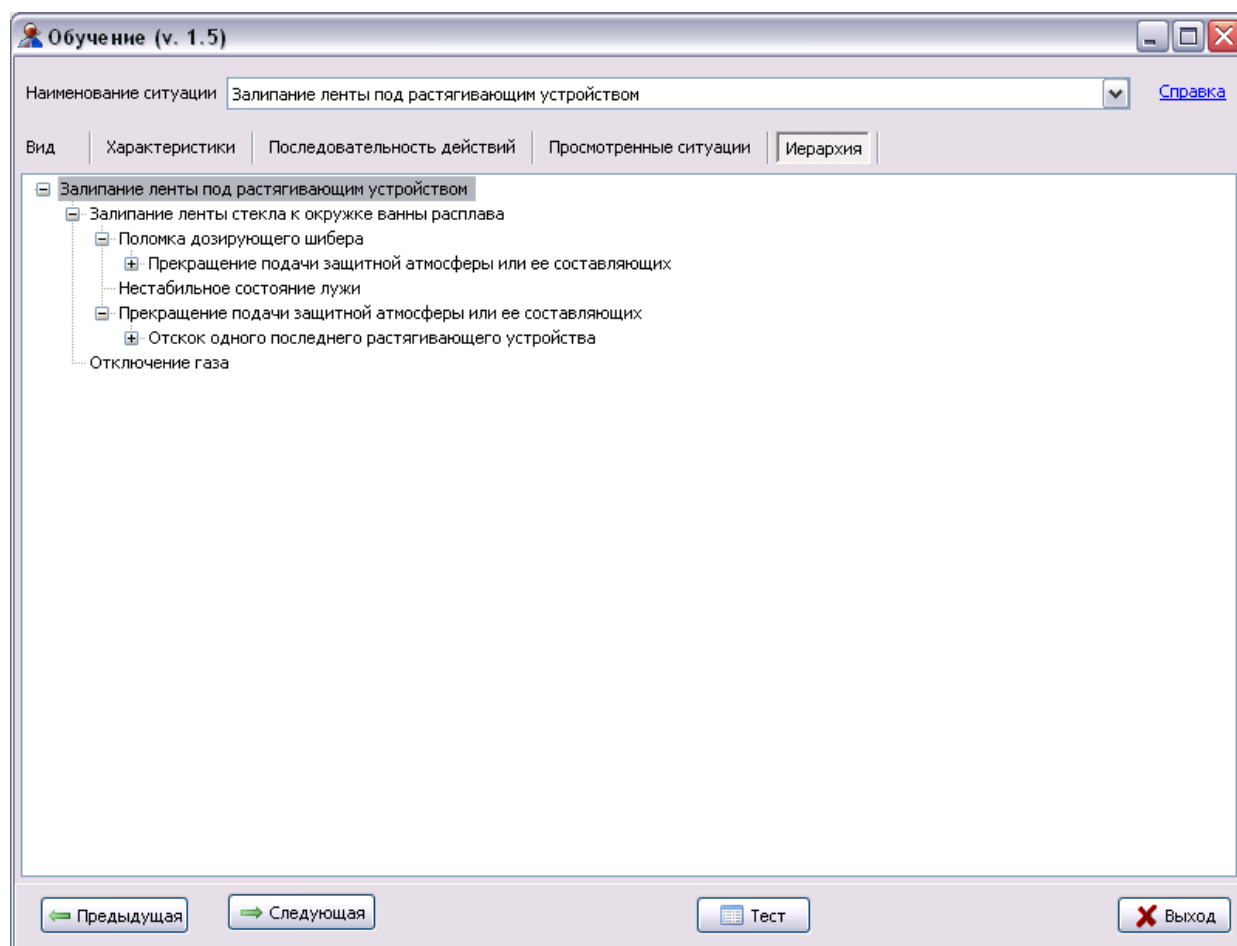


Рисунок 7.19 – Иерархия ситуаций

Технологами регулярно проводится анализ качества и особенностей формирования ВЛС флоат-методом и доопределяются параметры нештатных ситуаций ХТП с использованием теоретико-множественной модели;

постоянно адаптируются к изменяющимся условиям производства модели бизнес-процессов обучения и аттестации операторов. При подготовке исходной информации об аварийных ситуациях ХТП для наполнения БД цифрового двойника специалисты предприятия дополнительно решают важную задачу – задачу анализа и более полного понимания истинных причин возникновения опасных ситуации, а значит и разработки новых менее затратных способов их устранения [474].

Использование ППП цифрового тренажера для обучения операторов позволило руководству на АО «Саратовстройстекло» решить важную задачу снижения количества аварийных ситуаций на ХТП формования ленты стекла флоат-методом, обладающую большим экономическим эффектом за счет увеличения выпуска ВЛС и сокращения значительных периодов времени простоя производства из-за «обрывов» ленты стекла [481].

7.6. Выводы

Раздел 7.1. Применение предложенного в диссертационной работе многоагентного алгоритма управления планированием выпуска партий многоассортиментного ВЛС позволило выявить потенциал энергоресурсосбережения указанного производства и выработать научно-обоснованные решения по оптимизации его функционирования. В соответствии алгоритмом проведен кластерный анализ номенклатуры продукции многостадийного производства ВЛС, который позволил выделить 4 типа листовых стекол. На основе стратегической карты целей и показателей функционирования многостадийного производства ВЛС разработана системно-динамическая модель выпуска 4 типов листовых стекол. Разработана модель состояний агента «Производство» для переключения режимов производства в системно-динамической модели. Предложена дискретно-событийная многоагентная модель формирования пакетов заказов ВЛС разных типов. Выполнены численные эксперименты и оптимизация размеров партий выпуска многоассортиментного ВЛС по критерию максимальной

энергоэффективности с учетом ограничений, накладываемых сезонностью спроса на строительное ВЛС. Анализ результатов проведенных численных экспериментов позволяет при заданных интенсивностях заказов определить размеры партий выпуска ВЛС различных типов, обеспечивающие сокращение количества изменений технологических режимов производства ВЛС и повышение энергоресурсоэффективности многостадийного производства ВЛС.

Раздел 7.2. Разработанные в диссертационной работе нейросетевая модель и алгоритм автоматизированного управления составом стекольной шихты, а также реализующий их ППП, практически применялся в 2007 – 2010 гг. при эксплуатации единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло», что позволило повысить энергоресурсоэффективность многостадийного производства ВЛС.

Раздел 7.3. Предложенный подход к распознаванию точечных дефектов в стекле обеспечивает определение локализации наиболее часто встречающихся типов дефектов размером более 0,5 мм на основе применения линейных видеокамер средней ценовой категории. На основе предложенного подхода разработана автоматизированная система сканирования точечных дефектов в листовом стекле, которая формирует электронную карту дефектов и обеспечивает функционирование системы автоматического раскроя ленты стекла в реальном времени. Проведена апробация прототипа разработанного аппаратурно-технического и программно-информационного обеспечения АС диагностики точечных дефектов ЛС для оценки её эффективности при идентификации пороков стекла на АО «Саратовский институт стекла» в 2015-2017 гг. В результате апробации установлено, что ППП АС диагностики точечных дефектов ЛС обеспечивал устойчивую диагностику только точечных типов дефектов листового стекла.

Раздел 7.4. Предложенный логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла позволяет на стадиях проектирования

и модернизации определять и обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства высококачественного листового стекла.

Раздел 7.5. Использование ППП цифрового тренажера для обучения операторов позволило руководству на АО «Саратовстройстекло» решить важную задачу снижения количества аварийных ситуаций на ХТП формирования ЛС флоат-методом, обладающую большим экономическим эффектом за счет увеличения выпуска ВЛС и сокращения значительных периодов времени простоя производства из-за «обрывов» ленты стекла.

Ряд основных научных результатов диссертации практически используется в АО КБПА при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке АСУ техническими системами и услуг технологического инжиниринга, а также создания высокотехнологичного производства с применением инструментов «Индустрии 4.0»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработана нейросетевая модель автоматизированного управления составом стекольной шихты, позволяющая определить заданный технологический режим работы дозирочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья.

2. Предложена компьютерная модель ХТП непрерывного формования ленты стекла, позволяющая анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла на расплаве олова и создать ППП для цифрового тренажера по обучению персонала.

3. Предложен алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов ЛС, обеспечивающий автоматическое формирование электронной карты дефектов, которая необходима для функционирования системы автоматического оптимального раскроя ЛС в реальном времени.

4. Разработана компьютерная имитационная модель этапов ЖЦ производства ВЛС, которая необходима для определения вероятностей нахождения производства на каждом из этапов ЖЦ при автоматизированных расчетах показателей надежности производства ВЛС.

5. Разработаны архитектура и режимы функционирования ППП компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, применение которого исключает необоснованные проектные решения, сокращает время проектирования и ввода в эксплуатацию АСУТП производства ВЛС.

6. Предложена архитектура и режимы функционирования ППП диагностики точечных дефектов ЛС, применение которого позволяет на основе использования серийных аппаратных средств автоматически диагностировать наиболее часто встречающиеся точечные дефекты ЛС.

7. Разработаны архитектура и режимы функционирования ППП цифрового тренажера обучения персонала ХТП формования ленты стекла,

применение которого обеспечивает обучение и повышение квалификации персонала производства ВЛС.

8. На основе предложенных теоретических и практических результатов диссертации разработаны руководящие технические материалы по повышению надежности и эффективности производства ВЛС, которые могут быть применены при разработке цифровых двойников, обеспечивающих решение задач повышения энергоресурсоэффективности автоматизированных многостадийных химических и металлургических производств на основе оценки проектных решений, процедуры оптимального управления ХТП в реальном времени, прогнозирования аварийных ситуаций и обучения производственного персонала.

9. Разработанное методическое и программно-информационное обеспечение на основе использования современных методов математического моделирования ХТП, теории ИИ и инструментов «Индустрия 4.0», обеспечивает успешное решение актуальных задач иерархического управления энергоресурсоэффективностью и надежностью многостадийного производства ВЛС, прогнозирование режимов функционирования производства, что является важнейшим фактором обеспечения технологического лидерства Российской Федерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенных научно-практических результатов можно обоснованно утверждать, что содержание представленной диссертационной работы полностью соответствуют паспорту научной специальности 2.3.3. «Автоматизированное управление технологическими процессами и производствами».

Планируемые дальнейшие направления научных исследований соискателя будут направлены на разработку специальных экспертных систем поддержки принятия научно обоснованных решений по оптимальному управлению ХТП и ХТС производства ВЛС в реальном времени, а также

методологию оптимального управления промышленных производств различных листовых материалов: полимерной пленки, линолеума, бумаги и др.; разработку интеллектуальных вычислительных методов управления ремонтами и техническим обслуживанием непрерывных химико-технологических систем; разработку отечественного программно-информационного обеспечения цифровых производственных систем; разработку методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийных производств ВЛС, практическое использование которого обеспечит реализацию проекта технологического лидерства Российской Федерации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность своему научному наставнику и учителю, научному консультанту по диссертационной работе – академику РАН, заслуженному деятелю науки РФ, директору Международного Института Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева, профессору, д.т.н. **Валерию Павловичу Мешалкину** за многолетнюю поддержку, неоценимую помощь и неустанное внимание, ценные научно-методические рекомендации и советы.

Автор благодарит сотрудников лаборатории «Системный анализ и управление» Института проблем точной механики и управления РАН; преподавателей факультета компьютерных наук и информационных технологий СГУ им. Н.Г. Чернышевского; преподавателей кафедры «Системотехника» Института электронной техники и приборостроения СГТУ им. Гагарина Ю.А.; научных сотрудников Института прикладной математики и механики; преподавателей и научных сотрудников кафедры «Логистика и экономическая информатика» и Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ имени Д.И. Менделеева за важные методические рекомендации, постоянную организационную и техническую поддержку на протяжении всего периода работы.

Автор выражает особую благодарность и признательность сотрудникам Института проблем точной механики и управления РАН: член-корреспонденту РАН, профессору, д.т.н. **Резчикову Александру Федоровичу** и доценту, д.т.н. **Иващенко Владимиру Андреевичу** за формирование со студенческих лет интереса к научным исследованиям и техническим разработкам автоматизированных систем управления, важные научно-методические рекомендации по результатам научных исследований докторанта; профессору, д.ф.-м.н. **Макееву Николаю Николаевичу** и профессору, д.т.н., профессору СПбГПУ им. Петра Великого

Большакову Александру Афанасьевичу за постоянное внимание, методическую поддержку, организационную помощь, ценные научные консультации, советы и рекомендации.

Автор выражает глубокую благодарность химику-технологу **Филяниной Наталье Константиновне** за формирование интереса к физико-математическим и естественно-научным дисциплинам, конструированию технических систем и химико-технологическим процессам.

Автор благодарит членов экспертно-аналитического комитета Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях» за многолетнее внимательное обсуждение научных докладов соискателя и важные организационно-методические рекомендации и советы по содержанию научных исследований докторанта.

Автор благодарен всем инженерно-техническим работникам АО «Саратовстройстекло», АО «Саратовский институт стекла» и АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики» за консультации по различным аспектам производства листового стекла, за поддержку и внимание к его научно-исследовательской работе, за помощь в реализации на производстве основных результатов научных разработок автора.

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРМ – автоматизированное рабочее место

АРМО – автоматизированное рабочее место оператора (АРМО)

АС – автоматизированная система

БД – база данных

ВЛС – высококачественное листовое стекло

ВУ – вычислительный узел

ДСЛ – дозирочно -смесительная линия

ДСММ – дискретно-событийная многоагентная модель

ЕИАС – единая информационно-аналитическая система

ЖЦ – жизненный цикл

ИИ – искусственный интеллект

ИНС – искусственная нейронная сеть

ИС – информационная система

ИТДЛС – программный комплекс идентификации точечных дефектов
листового стекла

ККРВ – система контроля качества стела в реальном времени

ЛС – листовое стекло

МР – манипуляционный робот

МСА – модель состояния агента

НПТП – непрерывный технологический процесс

ОБДП – общая база данных производства

ОДЗ – область допустимых значений

ОЛВМ – общий логико-вероятностный метод

ПК ИТДЛС – программный комплекс идентификации точечных
дефектов листового стекла

ПП – производственный процесс

ППП – пакет прикладных программ

ППР – планово-предупредительный ремонт

ппс – пунктам паспорта специальности

РВ – реальное время

РО – рабочий орган

РТК – роботизированный технологический комплекс

СДМ – системно-динамическая модель

СКЦ – стратегическая карта целей

ССП – система сбалансированных показателей

СУБД – система управления базой данных

СФЦ – схема функциональной целостности

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы

ХТП – химико-технологический процесс

ХТС – химико-технологическая система

ЦД – цифровой двойник

ЦДП – цифровой двойник производства

ЦОТП – цифровизированный организационно-технический процесс

СПИСОК РУССКОЯЗЫЧНЫХ АББРЕВИАТУР

АСУ – автоматизированная система управления

АСУП – автоматизированная система управления предприятием

АСУПП – автоматизированная система управления

производственными процессами

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами

ГОСТ – государственный стандарт

ЕС – Европейский Союз

РАН – Российская академия наук

РФ – Российская Федерация

США – Соединенные Штаты Америки

СПИСОК АНГЛОЯЗЫЧНЫХ АББРЕВИАТУР

BPCS (Basic Process Control System) – базовая система управления технологическим процессом

CA (Computer Aided) – компьютерное обеспечение

CAD (Computer Aided Design) – проектирование с помощью компьютера

CAE (Computer Aided Engineering) – инженерное обеспечение

CAM (Computer Aided Manufacturing) – производство с помощью компьютера

CAP (Computer Aided Planning) – планирование с помощью компьютера

CAQ (Computer Aided Quality Assurance) – обеспечение качества с помощью компьютера

ERP (Enterprise Resource Planning) – планирование ресурсов предприятия

FIC (Failsafe Interlock Controller) – контроллер безопасности с блокировкой

LAH (Level Alarm Human) – уровень сигнализации оператору

LOPA (Layer of Protection Analysis) – анализа уровней защиты

LSH (Level Safety hardware) – уровень безопасности аппаратный

LSHH (Level Safety hardware) – уровень безопасности реализуемый аппаратно

MCT (Manufacturing Control) – контроль изготовления продукции

MES (Manufacturing Execution Systems) – система управления производством

MLP (MultiLayer Perceptron) – многослойный персептрон

NC (Numerical Control) – числовое управление

NC/RC (Numerical/Robot Control) – числовое/роботизированное управление (NC/RC)

PCT (Production Control) – контроль производства

PLC (Program Logic Control) Программное логическое управление

PLM (Product Lifecycle Management) – жизненным циклом продукта

PRV (Pressure Relief Valve) – клапан безопасности давления

RC (Robot Control) – роботизированное управление

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – диспетчерское управление и сбор данных

SIS (Safety Instrumented Systems) – системы инструментальной безопасности

SysML (Systems Modeling Language) – язык моделирования систем

TPS (Tecnomatix Plant Simulation) – программная среда имитационного моделирования систем и процессов

UML (Unified Modeling Language) – унифицированный язык моделирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В.В. Принципы системно-информационного анализа эффективности химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г.И. Манко // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 259. № 5. С. 1160-1165.
2. Мешалкин, В. П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем / В. П. Мешалкин. - Смоленск : Принтэкспресс, 2021. 442 с.
3. Meshalkin V. P., State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering / V. P. Meshalkin, A. V. Belyakov, O. B. Butusov [et al.] // Mendeleev Communications. 2021. Vol. 31. N5. pp. 593-604. DOI 10.1016/j.mencom.2021.09.003.
4. V. P. Meshalkin, System analysis of the efficiency and competitiveness of chroming technologies / E. G. Vinokurov, V. P. Meshalkin, E. A. Vasilenko [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. Vol. 50. N5. pp. 730-738. DOI 10.1134/S0040579516050389.
5. Мешалкин В. П. Моделирование процессов обжига фосфоритовых окатышей в плотном слое / В. И. Бобков, В. В. Борисов, М. И. Дли, В. П. Мешалкин // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49, № 2. С. 182-188. DOI 10.7868/S0040357115020025.
6. Мошев Е. Р. Автоматизированная система логистического обеспечения технического обслуживания оборудования химических производств / Е. Р. Мошев, В. П. Мешалкин // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48, № 6. С. 709-718. DOI 10.7868/S0040357114060074.
7. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials / V. I. Bobkov, V. V. Borisov, M. I. Dli, V. P. Meshalkin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. N6. pp. 842-846. DOI 10.1134/S0040579515060020.

8. Мешалкин В. П. Интеллектуальный логико-информационный алгоритм выбора энергоресурсоэффективной химической технологии / Б. Б. Богомолов, В. С. Болдырев, В. П. Мешалкин [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53, № 5. С. 483-492. DOI 10.1134/S0040357119050026.

9. Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии : основы стратегии : монография / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов ; ответственный редактор Н. М. Жаворонков. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2024. 499 с.

10. Марчук Г.И. Избранные труды: в 5 т. / Российская академия наук, Институт вычислительной математики. - М.: РАН, 2018. Т.2.: Сопряженные уравнения и анализ сложных систем / [отв. ред. В. Б. Залесный, В. И. Агошков, В. П. Шутяев]. 500 с.

11. Васильев Ю. С. Научно-педагогическая школа «Системный анализ в проектировании и управлении» и ее вклад в учебный процесс вузов / Ю. С. Васильев, В. Н. Волкова, В. Н. Козлов, А. А. Ефремов // Открытое образование. 2018. Т. 22, № 1. С. 70-82. DOI 10.21686/1818-4243-2018-1-70-82.

12. Васильев С. Н. Интеллектуальные системы управления: коллективная монография / [Г. Н. Зверев и др.]; под ред. С. Н. Васильева. - М: Машиностроение, 2010. 535 с.

13. Новиков, А. М. Методология / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М.: ООО НПО Синтег, 2007. 668 с.

14. Макаров В. Л. Применение экономико-математических методов и моделей оптимального планирования в цифровой экономике будущего (ЦЭМИ АН СССР и ЦЭМИ РАН: прогностическая интерпретация и развитие научного наследия нобелевских лауреатов Л. В. Канторовича и В. В. Леонтьева) / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Е. Л. Логинов. – Москва: Центральный экономико-математический институт РАН, 2022. 248 с. DOI 10.48612/Bujet/vamm-r6ez-n1kf.

15. Саркисов П. Д. Системный анализ безопасного обращения химической продукции: методы и подходы к прогнозированию и классификации опасностей / П. Д. Саркисов, А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47, № 1. С. 26-35. DOI 10.7868/S0040357113010144.

16. Прангишвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопр. упр. сложными системами / И.В. Прангишвили; Рос. акад. наук. Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова. - М.: Наука, 2003. 426 с.

17. Махутов Н. А. Природно-техногенно-социальные системы и риски / Н. А. Махутов, В. П. Петров, Р. С. Ахметханов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2004. № 3. С. 3-28.

18. Резчиков А. Ф. Системный анализ аварийных комбинаций событий при управлении человеко-машинными системами / А. Ф. Резчиков, А. С. Богомолов. - Саратов: Издательство Саратовского университета. 2021. 128 с.

19. 52. Системный анализ человеко-машинного взаимодействия на основе статусных функций при формировании объемного изображения в волюметрических дисплеях / А. А. Большаков, А. А. Сгибнев, И. В. Вешнева [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2017. № 40(66). С. 102-110.

20. 54. Бобков В.И. Ресурсосбережение в электротермии при подготовке сырья на обжиговых машинах конвейерного типа // Электрометаллургия. 2015. №7. С. 26-34.

21. Васильев Е. М. Многоальтернативное поведение в критических режимах как модель биологического процесса принятия решений / С.Л.Подвальный, Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2015. № 2. С. 105-113.

22. Налетов В. А. Методологические основы системного информационного подхода к оптимальной организации сложных

технологических объектов / В. А. Налетов, М. Б. Глебов // Кокс и химия. 2020. № 1. С. 43-49.

23. Егоров А. Ф. Методы и модели анализа риска и управления безопасностью химических производств / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44, № 3. С. 341-353.

24. Ицкович Э. Л. Методы комплексной автоматизации производства технологического типа: Контроль и учет работы производства. Сведение материального баланса. Оперативное управление. Обслуживание и ремонт оборудования. Автоматизация лаборатории. Учет и управление энергоресурсами. Организационная поддержка / Э. Л. Ицкович. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2013. 295 с.

25. Троицкий В.А. Системный анализ и принятие решений. Дополнительные главы / под ред. В.Н. Козлова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2009. 137 с.

26. Системный анализ процессов химической технологии: массовая кристаллизация: Монография / И. Н. Дорохов, Э. М. Кольцова, В. В. Кафаров, Н. М. Жаворонков. – 2-е изд., пер. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019. 368 с.

27. Соловьев, Д. С. Решение многокритериальной задачи выбора гальванического покрытия с использованием метода анализа иерархий / Д. С. Соловьев, И. А. Мукина, Ю. В. Литовка // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 1. С. 18-27.

28. Golovanov, P. Analysis of Impact Made by the Flagship University on the Efficiency of Petrochemical Complex / P. Golovanov, M. Y. Livshits, E. Tuponosova // Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 260. pp. 289-300. DOI 10.1007/978-3-030-32648-7_23.

29. Макаров Р. И. К оценке методов анализа точности и стабильности процессов / Р. И. Макаров, Е. Р. Хорошева // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2012. № 4(22). С. 68-73.

30. Досаев А. А. Разработка архитектуры базы данных биотехнологических процессов с использованием методов системного анализа / А. А. Досаев, Н. В. Меньшутина // Успехи в химии и химической технологии. 2024. Т. 38, № 9(288). С. 31-33.

31. Пащенко Ф. Ф. Идентификация объектов в информационно-управляющих системах / И. С. Дургарян, Ф. Ф. Пащенко, А. Ф. Пащенко, Г. А. Пикина // Датчики и системы. 2014. № 10(185). С. 13-21.

32. Спирин Н. А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н. А. Спирин, В. В. Лавров, В. Ю. Рыболовлев [и др.]. - Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2014. 462 с.

33. Чистякова Т.Б. Интеллектуальный анализ промышленных данных для ресурсосберегающего управления сталеплавильным конвертерным производством / Т. Б. Чистякова, И. В. Новожилова, В. А. Кудлай, В. В. Козлов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2018. Т. 2. С. 72-75.

34. Шинкевич, А. И. Анализ трендов научно-исследовательского развития промышленности на основе методов математического моделирования / А. И. Шинкевич, А. А. Лубнина, В. В. Бронская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24, № 4(108). С. 68-74. DOI 10.37313/1990-5378-2022-24-4-68-74.

35. Dwyer, B. Systems Analysis and Synthesis: Bridging Computer Science and Information Technology. Morgan Kaufmann, 2016. 486 p. DOI: 10.1016/C2015-0-04158-2

36. Chen B. System Parameter Identification. Information Criteria and Algorithms/ B.Chen, Y.Zhu, J. Hu, J.C. Principe // 2013. 266 p.

37. Grady J.O. System Requirements Analysis // 2013. 843 p.

38. Krallmann H., Systemanalyse im Unternehmen – prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik/ Krallmann H., Schoenherr A., Trier M.: // Oldenbourg Verlag Muenchen Wien, 5. Auflage. 2007. 467p.

39. Stephanopoulos, G. & Henning, Gabriela & Leone, Horacio. (2015). MODEL LA, a language for process engineering Part I and II. Computers Chem. Engng. 14. pp. 813-869.
40. Venkatasubramanian, V. The promise of artificial intelligence in chemical engineering: Is it here, finally?. AIChE Journal. 2019. Vol. 65. N2. pp. 466-478.
41. Westerberg A.W. Knowledge-based expert systems: an emerging technology for CAD in chemical engineering. / Bañares-Alcántara R, Sriram D, Venkatasubramanian V, Westerberg AW, Rychener MD.// Chem Eng Prog. 1985/ N9. pp. 127-142.
42. Whitten, J.L. Systems analysis and design methods / Jeffrey L. Whitten, Lonnie D. Bentley. 7th ed. 2007. 762p.
43. Янг С. Системное управление организацией. Пер. с англ. под ред. С. П. Никанорова, С. А. Батасова. - М.: «Советское радио». 1972. 456 с.
44. Рябинин И. А. Структурно-сложные системы и их формализация с помощью функций алгебры логики // Биосфера. 2011. №4. С. 455-461.
45. Блауберг И.В. Из истории системных исследований в СССР: попытка ситуационного анализа // Вопросы философии. 1991. № 8. С. 118-128.
46. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. - Санкт-Петербург: Политехника. 2000. 248 с.
47. Новиков Д.А. Методология управления. - М.: Либроком. 2011. 128 с.
48. Арбиб М., Мейнс Э.Дж. Основания теории систем: разложимые системы // Математические методы в теории систем. М.: Мир. 1979. С. 7 - 49.
49. Васильев, Ю. С. Теории систем и системный анализ: истоки и перспективы / Ю. С. Васильев, В. Н. Волкова, В. Н. Козлов // Системный анализ в проектировании и управлении : Сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 13–14 октября 2021 года. Том Часть 1. - Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого". 2021. С. 7-29. DOI 10.18720/SPBPU/2/id21-45.

50. Глушков В.М. Кибернетика / Большая советская энциклопедия // – 3-е издание. - М.: Советская энциклопедия. 1973. Т.12. С. 75-79. https://archive.org/details/B-001-033-601-30vols/BSE_3izd_12/mode/2up

51. Глушков В.М. Основы безбумажной информатики. Изд. 2-е, испр. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.. 1987. 552с.

52. Прангишвили И. В. Системный подход, системное мышление и энтропизация фундаментальных знаний / И. В. Прангишвили // Проблемы управления. 2003. № 1. С. 3-7.

53. Zhu, D., Yin, H., Xu, Y. et al. A Survey of Advanced Information Fusion System: from Model-Driven to Knowledge-Enabled. Data Sci. Eng. N8, pp.85–97 (2023). DOI 10.1007/s41019-023-00209-8

54. Хубка В. Теория технических систем: пер. с нем. - М.: Мир. 1987. 208 с.

55. Полякова, М. А. Системный анализ технологического процесса горячей прокатки стальной полосы / М. А. Полякова, Е. Н. Ширяева, М. В. Налимова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 2. С. 360-369.

56. Герасимов, Б. И. Феноменологическое представление системного анализа / Б. И. Герасимов, Г. Л. Попова // Экономический анализ: теория и практика. 2011. № 19(226). С. 2-8.

57. Системный анализ адаптивных электротехнических комплексов / Ю.Б. Томашевский, Н.П. Митяшин; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Саратовский гос. технический ун-т. - Саратов: Саратовский гос. технический ун-т, 2006. 129с.

58. Малышев В. В. Метод принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности / В. В. Малышев, Б. С. Пиявский, С. А. Пиявский // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 46-61.

59. Малышев В. В. Синтез оптимального управления при решении задачи удержания космического аппарата в орбитальной группировке / В. В. Малышев, А. В. Старков, А. В. Федоров // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. № 4(69). С. 150-158.

60. Многокритериальный выбор оборудования на основе нечеткой меры ценности критериев / А. Ф. Резчиков, Н. П. Митяшин, Б. М. Кузьмиченко [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 1. С. 54-58.

61. Рапопорт, Э. Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации / Э. Я. Рапопорт. – Москва : Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 2000. 336 с.

62. Берталанфи Л. фон. Исторический статус общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник 1973. - М.: 1973. С. 20-37 [Электронный ресурс]. - URL: https://systems-analysis.ru/assets/systems_research_1973.pdf (дата обращения: 21.05.2024).

63. Пупков К. А. Применение интеллектуальных технологий - перспективное направление развития теории и практики проектирования и создания систем обработки информации и управления / К. А. Пупков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 4. С. 44-52.

64. Прангишвили И. В. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям / И. В. Прангишвили, В. А. Потоцкий, К. С. Гинсберг, В. В. Смолянинов // Проблемы управления. 2004. № 4. С. 2-15.

65. Васильев С.Н. К интеллектуальному управлению // Нелинейная теория управления и ее приложения. - М.: Физматлит, 2000. С. 57-126.

66. Sargent Roger. Introduction: 25 years of progress in process systems engineering. Computers & Chemical Engineering. (2004). N28. pp.437–439. DOI 10.1016/j.compchemeng.2003.09.032.

67. Степанов М. Ф. Нейронные сети для планирования решения задач теории автоматического управления / М. Ф. Степанов // Проблемы управления. 2004. № 2. С. 66-71.

68. Резчиков А. Ф. Причинно-следственные комплексы взаимодействий в производственных процессах / А.Ф. Резчиков, В.А. Твердохлебов // Проблемы управления. 2010. № 3. С. 51-59.

69. Анализ критических ситуаций, вызванных неблагоприятным течением обстоятельств / В.В. Ключев, А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников, В.А. Твердохлебов, В.А. Иващенко, А.С. Богомолов, Л.Ю. Филимонюк // Контроль. Диагностика. 2014. № 7. С. 12-16. DOI 10.14489/td.2014.07.

70. Кафаров В. В. Моделирование сложных химико-технологических процессов на основе методов алгебры логики / В. В. Кафаров, В. Н. Щеглов, И. Н. Дорохов // Доклады Академии наук СССР. 1976. Т. 231. № 6. С. 1415-1418.

71. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика. Т. I / Н.Е. Кочин, А.И. Кибель, Н.В. Розе. - М.: Физматгиз. 1963. 584 с.

72. Окрепилов В.В. Применение суперкомпьютерных технологий для моделирования социально-экономических систем / В.В. Окрепилов, В.Л. Макаров и др.// Экономика региона. 2015. № 2(42). С. 301-312. DOI 10.17059/2015-2-24.

73. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян, А. С. Акопов // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15, № 2. С. 7-20. DOI 10.17323/2587-814X.2021.2.7.20.

74. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем - М.:Наука. 1968. 356с.

75. Большаков А. А. Системный анализ, математическое моделирование и оптимизация процесса формирования производственного расписания обработки металлоконструкций / А. А. Большаков, Л. А. Слободянюк, О. Е. Шашихина, Я. А. Ковальчук // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 7. С. 84-92.

76. Бессарабов А. М. Виртуальное моделирование аналитической лаборатории научно-производственного комплекса малотоннажной химии / В. Е. Трохин, Д. А. Гришаева, А. М. Бессарабов, Е. Р. Вишникина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 12. С. 8-14. DOI 10.25791/pribor.12.2023.1458.

77. Резчиков А. Ф. Управление электропотреблением промышленных предприятий / А. Ф. Резчиков, В. А. Иващенко. - Саратов: ИЦ "Наука". 2008. 183 с.

78. Синтез дискретного регулятора для построения распределенной системы управления температурным режимом проточного нагревателя нефтепродукта / В. А. Коваль, В. Н. Осенин, С. И. Суятинов, О. Ю. Торгашова // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 4. С. 132-147.

79. Макеев Н. Н. Динамические модели механических систем / Н. Н. Макеев // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2011. № 4(8). С. 33-40.

80. Плешивцева, Ю. Э. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами / Ю. Э. Плешивцева, Э. Я. Рапопорт // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2009. № 3. С. 22-33.

81. Барбасова Т. А. Исследование производственных характеристик доменного процесса / Х. М. Мохсен, Т. А. Барбасова // Естественные и технические науки. 2018. № 4(118). С. 258-264.

82. Казаринов Л. С. Метод эллиптических центроидов в управлении эффективностью технологических процессов / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т. 15. № 1. С. 152-155.

83. Казаринов Л. С. Анализ влияния параметров теплового состояния доменной печи на ее эффективность / Л. С. Казаринов, Мохсен Хаитхм Мохаммед Али, Т. А. Барбасова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 2(198). С. 23-27. DOI 10.17213/0321-2653-2018-2-23-27.

84. Цифровая трансформация исследовательской, проектной и производственной деятельности в химических технологиях / О. И. Седяров, Е. В. Отрубянников, П. А. Пустовойт, А. И. Польшуев // Промышленные процессы и технологии. 2024. Т. 4, № 1(11). С. 86-98. DOI 10.37816/2713-0789-2024-4-1(11)-86-98.

85. Khorosheva E. R. Salient Aspects of the Implementation of Digital Economics in Glass Plants in Russia / R. I. Makarov, // Glass and Ceramics. 2019. Vol. 75, N11-12. pp. 438-440. DOI 10.1007/s10717-019-00107-4.

86. Reaney, I.M. Resource efficiency and energy efficiency (REEE) in the Portuguese ceramic industry: Towards net zero carbon production / I.M. Reaney, B. Walsh, P.M. Vilarinho // Open Ceramics Volume 15, September 2023, 100390. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100390>

87. Kim J. Energy, material, and resource efficiency for industrial decarbonization: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options / J. Kim, B.K. Sovacool, M. Bazilian, S. Griffiths, M. Yang // Energy Research & Social Science. Volume 112, June 2024, 103521

88. To pick (or not to pick) the high-hanging fruits: Cleaner production audits and firm total factor energy efficiency / Zh. Chen, L. Zhou, Ce. Jia, X. Guo // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 186. P. 113661. DOI 10.1016/j.rser.2023.113661

89. Казаринов Л. С. Система управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 23(282). С. 21-25.

90. Барбасова Т. А. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова, О. В. Колесникова, А. А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14, № 1. С. 5-13.

91. Сальников В.В. Роль технологической информации в обеспечении эффективного энергопотребления предприятий/ А.Н. Ивутин, В.В. Сальников // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №8-1. С. 165 - 170.

92. Смагин, В. Н. Энергосбережение - условие эффективной работы предприятий черной металлургии / В. Н. Смагин, Р. Ойленбах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2011. № 28(245). С. 110-117.

93. Макаров Р. И. Управление тепловым режимом ванной печи по однородности вырабатываемого стекла/ Р И Макаров, Е Р Хорошева // Стекло и керамика, 1999. №12. С. 3-4.

94. Шенец Е. Л. Комплексная оценка регулировочной способности энергоэффективности предприятия по производству листового стекла / Е. Л. Шенец // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 2(54). С. 59-70.

95. Барышникова Е. С. Разработка системы ситуационного управления при производстве листового стекла / Е. С. Барышникова, В. А. Иващенко, А. Ф. Резчиков // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022) : Труды Пятнадцатой международной конференции, Москва, 26–28 сентября 2022 года / Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д.

Цвиркуна. - Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2022. С. 173-179. DOI 10.25728/mlsd.2022.0173.

96. Грунтович Н. В. Оценка энергоэффективности модернизации производства листового стекла/ Н. В. Грунтович, Е. Л. Шенец, С. А. Жеранов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2013. №4 (55). С. 79-86.

97. Лившиц М. Ю. Системный анализ уровня автоматизации предприятий нефтеперерабатывающей промышленности / М. Ю. Лившиц // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2019. Т. 12-2. С. 14-22.

98. Кушников В. А. Математическое моделирование процессов функционирования сложных систем / В. А. Кушников, А. Ф. Резчиков, В. А. Иващенко [и др.] // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2017. Т. 11. С. 83-91.

99. Невиницын В. Ю. Моделирование и анализ химического реактора как объекта управления / В. Ю. Невиницын, А. Н. Лабутин, Г. В. Волкова, А. В. Кукушкин // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2018. Т. 3. С. 94-97.

100. Большаков А. А. Системный анализ и моделирование процесса визуализации с использованием псевдогологографического автостереоскопического дисплея / А. А. Большаков, А. А. Сгибнев // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2016. № 12(94). – С. 260-263.

101. Малышев В. В. Вступительное слово. Открытие XXVII конференции «Системный анализ, управление и навигация» / В. В. Малышев // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов XXVII научной конференции, Евпатория, 02–09 июля 2023 года. - Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Буки Веди", 2023. С. 13-14.

102. Курносоев А.А., Совместимость сложных технических систем – системный анализ таксономий/ А.А. Курносоев, А.А. Рудко // В книге:

Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXVII научной конференции. Москва, 2023. С.62-63.

103. Irina Veshneva, Development of a Decision Support System for Assessing and Monitoring Regional Competitiveness Risks/ Galina Chernyshova, Ekaterina Piunova , Irina Veshneva, Gleb Rokakh // Springer, Cham. Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control, 2023. vol. 437. pp. 161-174.

104. Method for Constructing Virtual Reality Simulators for Turning and Milling for an Engineering Education System for Building Cyber-Physical Systems / Roman Aslanov, Alexander Bolshakov // Springer, Cham. Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control, 2023. vol. 437. pp. 91-106.

105. The New Method for Automatic Vectorization Efficiency Increasing / V. A. Egunov and Alla G. Kravets // Springer, Cham. Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control, 2024. vol. 554. pp. 195-208.

106. Mathematical Modeling of Electrolysis Technology for Hydrogen Production and Process Control / Yuliya Pleshivtseva, Egor Mironov // Springer, Cham. Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control, 2024. vol. 554. pp. 143-152.

107. Кафаров В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы химической и смежных отраслей промышленности/ В.В. Кафаров, В.В. Макаров, А.Ф. Егоров // Итоги науки и техники. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 16. М.: ВИНТИ, 1988. С. 92.

108. Егоров А. Ф. Современное состояние в области анализа, синтеза и оптимального функционирования многоассортиментных цифровых химических производств: Аналитический обзор / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, П. Г. Михайлова // Теоретические основы химической технологии, 2021. Т. 55. № 2. С. 154-187/

109. Резчиков А.Ф. Управление энергетикой промышленных предприятий / А.Ф. Резчиков. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 346с.

110. ГОСТ 24.104-2023 Автоматизированные системы управления Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2023. 8 с.

111. ГОСТ 34.602-2020. Межгосударственный стандарт. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. - М.: Стандартиформ, 2020. 8 с.

112. ГОСТ 24.103-84 Автоматизированные системы управления. Основные положения. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1984. 6 с.

113. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР. 1990. 24 с.

114. Dan BIZUBAC, Research of industrial processes in automation / Dan BIZUBAC, Marcel Sabin POPA, Bernd Otto HÖRMANN, Adrian Sorin FAUR // ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering Vol. 61, No 2 (2018) [Электронный ресурс]: - URL: <https://atnamam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/990/918>

115. Вартамян, А. А. Комплексная информационная система управления предприятием промышленности в эпоху цифровизации / А. А. Вартамян // Экономика России: проблемы, закономерности и перспективы : сборник научных трудов Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет». – М.: ООО "Издательство "Спутник+". 2020. С. 221-227.

116. Kayser K.-H. Siemens Industrial Automation Systems Summer School. Introduction / K.-H. Kayser // Faculty Mechatronics and electrical engineering at University of Applied Sciences Esslingen. 2014. 19 p.

117. Решетников, И. С. Системный ландшафт современной АСУПП / И. С. Решетников // Автоматизация в промышленности. 2019. № 8. С. 21-27.

118. Решетников, И. С. Анализ применимости систем визуальной биометрической идентификации в системах класса MES / И. С. Решетников,

Р. А. Мошкович // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 3(187). С. 21-26. DOI 10.52190/2073-2597_2022_3_21.

119. Armenta A. A Look Into Popular Manufacturing Execution System (MES) Software / Antonio Armenta // control.com. April 26, 2021. [Электронный ресурс]. - URL: <https://control.com/technical-articles/a-look-into-popular-manufacturing-execution-system-mes-software/> (дата обращения: 21.02.2025).

120. Moones Emna PLM Standards Modelling for Enterprise Interoperability: A Manufacturing Case Study for ERP and MES Systems Integration Based on ISA-95 / Emna Moones, Thomas Vosgien, Lyes Kermit, Dafaoui El Mouloudi // Conference: International IFIP Working Conference on Enterprise Interoperability. May 2015. DOI:10.1007/978-3-662-47157-9_14 [Электронный ресурс]. - URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-47157-9_14 (дата обращения: 21.02.2025)

121. ISA95. Enterprise-Control System Integration - ISA. [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95> Accessed 16 Jun 2024 (дата обращения: 21.02.2025)

122. Плахов Д.Б. Интеграция систем контроля и управления: выбор решения // Автоматизация в промышленности. 2008. №9. С.31-35.

123. SIMATIC IT для построения MES систем. От планирования к производству // Информация по продукту Siemens. Минск: СИС Инжиниринг СЗАО. 2006. 24 с.

124. Компания Siemens успешно реализовала пилотный проект по переводу процесса изготовления газовых турбин в цифровое управление // САПР и графика. 2021. № 2(292). С. 70-72.

125. Johnsson C. Applying ISA95 - a vendor perspective / C. Johnsson// Conference: ISA Expo. Houston, TX, USA. October 2004. [Электронный ресурс]. - URL: https://www.researchgate.net/publication/281063661_Applying_ISA95_-_a_vendor_perspective (дата обращения: 23.07.2025)

126. Информация по продуктам Siemens. - М.: ООО Сименс, 2017. 244 с.

127. Валюнин К. К. Программируемые логические контроллеры ОВЕН / К. К. Валюнин // Автоматизация в промышленности. 2017. № 6. С. 43-44.
128. Сергиенко Н. Н. Новые разработки для встраиваемых и магистрально-модульных систем / Н. Н. Сергиенко // Автоматизация в промышленности. 2020. № 3. С. 53-57. DOI 10.25728/avtprom.2020.03.13.
129. Воробьев С. С. Промышленные неуправляемые Ethernet-коммутаторы Advantech серии EKI-2000 / С. С. Воробьев // Автоматизация в промышленности. 2019. № 4. С. 58-61.
130. Юнусбаев Р. И. Основные особенности, возможности и преимущества среды CODESYS / Р. И. Юнусбаев // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". 2023. № 17. С. 125-131.
131. Адищев И. В. Концепция создания компьютерных тренажерных комплексов на открытом программном обеспечении / И. В. Адищев, И. А. Вялых // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2023. № 2. С. 129-141. DOI 10.15593/2224-9400/2023.2.08.
132. Анзимиров Л. В. Жить в эпоху ИТ-революции – это захватывающе! / Л. В. Анзимиров // Автоматизация в промышленности. 2018. № 2. С. 3-4.
133. АдАстра выпустила TRACE MODE 7.1 под Linux и Windows [Электронный ресурс]: Сайт компании АдАстра - URL: https://tracemode.ru/news/articles/tracemode71_rel (дата обращения 20.07.2024)
134. Kagermann H. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen / H.Kagermann, W.-D. Lukas, W.Wahlster // Revolution VDI nachrichten, Berlin, 1. 4. 2011, [Электронный ресурс]: - URL: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/produktion/industrie-40-mit-internet-dinge-weg-4-industriellen-revolution/> (дата обращения 22.01.2024)
135. Белов В.Б. Новая парадигма промышленного развития Германии - стратегия “Индустрия 4. 0” // Современная Европа. 2016. №5 (71). [Электронный ресурс]: - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya->

paradigma-promyshlennogo-razvitiya-germanii-strategiya-industriya-4-0 (дата обращения: 27.02.2024).

136. Демкович Н.А. Многоуровневое моделирование цифровых производств / Н.А.Демкович, Г.Е. Абаев, Е.И. Яблочников // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. – СПб.: Университет ИТМО, 2018.

137. D.J.Edgar Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. / D.J.Edgar, T.Porter, J.Bernaden, J.Sarli // Computers & Chemical Engineering, 47, (2012). 145–156. [Электронный ресурс]: - URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.037>. (дата обращения 22.01.2024).

138. Roll Forming and Industry 4.0 Cheerleading the Continuing Integration of Manufacturing [Электронный ресурс]: Сайт компании AMS Controls - URL: <https://www.amscontrols.com/kb/roll-forming-and-industry-4-0/> (дата обращения 20.07.2024)

139. ГОСТ Р 59799-2021 «Национальный стандарт Российской Федерации «Умное производство модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)). – М.: Стандартинформ. 2021. 24 с.

140. Plattform Industrie 4.0 / Hrsg. BITKOM, VDMA, ZVEI: Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 – Ergebnisbericht, Berlin, April 2015 [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/308992304_Industrie_40_-_Digital_Transformation_in_Product_Engineering_and_Production (дата обращения 22.11.2025)

141. IEC 62890:2020 Industrial-process measurement, control and automation - Life-cycle-management for systems and components. [Электронный ресурс]: - URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/30583> (дата обращения 02.11.2025)

142. Lucato W. Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies. / W. Lucato, A. Pacchini, F. Facchini, G. Mummolo. // IFAC-PapersOnLine. 52. (2019). 1808-1813. DOI 10.1016/j.ifacol.2019.11.464.

143. Batchkova I. A. Assessment of readiness for «Industry 4.0» /I. A. Batchkova, G.T. Popov, Ts. A. Ivanova, Y.A. Belev // Year III, Issue 6, (2018). pp. 288-291.

144. Lindner M. Digital Twins in Manufacturing: A RAMI 4.0 Compliant Concept./ M. Lindner, L. Bank, J. Schilp, M. Weigold // Sci 2023, 5, 40. [Электронный ресурс]: - URL: <https://doi.org/10.3390/sci5040040> (дата обращения 22.01.2024)

145. Lim K. A state-of-the-art survey of Digital Twin: Techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. / K.Y.H. Lim, P. Zheng, C. Chen // J. Intell. Manuf. 2020, 31, 1313–1337. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/337363063_A_state-of-the-art_survey_of_Digital_Twin_techniques_engineering_product_lifecycle_management_and_business_innovation_perspectives (дата обращения 12.03.2021)

146. Горькавый М. А. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, В. А. Соловьев [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 1(65). С. 40-46. DOI 10.17084/20764359-2023-65-40.

147. Сайт компании Siemens [Электронный ресурс]: Цифровой двойник. – URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/glossary/digital-twin/24465> (дата обращения 21.01.2024).

148. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: Краткий доклад (сентябрь 2019 года) / А. И. Боровков, А. А. Гамзикова, К. В. Кукушкин, Ю. А. Рябов. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. 62 с.

149. Сайт компании Siemens [Электронный ресурс]: Цифровой двойник. – URL: <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/the-digital-twin.html> (дата обращения 19.07.2024).

150. Сайт компании PLM-S [Электронный ресурс]: Цифровой двойник Siemens. – URL: <https://plm-s.com/digitalisation/digital-twin/index.html> (дата обращения 19.07.2024).

151. Maksim Dli Energy and Resource Efficiency in Apatite-Nepheline Ore Waste Processing Using the Digital Twin Approach / Maksim Dli , Andrei Puchkov , Valery Meshalkin , Ildar Abdeev , Rail Saitov. / *Energies* 2020, 13, 5829; [Электронный ресурс]: – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5829/pdf> (дата обращения 25.01.2021)

122. Кораблев А.В. Ключевые функциональность и преимущества использования цифровых двойников в промышленности / А.В. Кораблев // *Цифровая экономика*. 2019. № 2 (6). С. 5-11.

153. Макаров В.Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий/ В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Г.Л. Бекларян // *Бизнес-информатика*. 2019. Т. 13. № 4. С. 7–16. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16.

154. Fei T. MakeTwin: A reference architecture for digital twin software platform. / Tao, Fei & Sun, Xuemin & Cheng, Jiangfeng & Zhu, Yonghuai & Liu, Weiran & Wang, Yong & Xu, Hui & Hu, Tianliang & Liu, Xiaojun & Liu, Bao & Xiang, Feng & Jin, Xiaohui. // *Chinese Journal of Aeronautics*. (2023). 55 p. DOI 10.1016/j.cja.2023.05.002.

155. Sierla S. Roadmap to semi-automatic generation of digital twins for brownfield process plants/ S.Sierla, M.Azangoo, K.Rainio, N.Papakonstantinou, A.Fay, P.Honkamaa, V. Vyatkin, // *Journal of Industrial Information Integration*, Volume 27, 2022, 10 p. [Электронный ресурс]: – URL: https://www.researchgate.net/publication/370609853_makeTwin_A_reference_architecture_for_digital_twin_software_platform (дата обращения 01.11.2024)

156. Redelinghuys A.J.H. A six-layer architecture for the digital twin: A manufacturing case study implementation. / A.J.H.Redelinghuys; A.H.Basson; K.Kruger // *J. Intell. Manuf.* 2020, 31, 1383–1402 [Электронный ресурс]: - URL:

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10845-019-01516-6> (дата обращения 21.01.2024).

157. Речкалов А.В. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия / А.В. Речкалов, А.В. Артюхов, Г.Г. Куликов, В.Н. Новиков // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2022. №1 (95). [Электронный ресурс]: - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-sistemnogo-predstavleniya-predmetnoy-oblasti-pri-formirovanii-tsifrovogo-dvoynika-proizvodstvennogo-protssessa> (дата обращения: 10.07.2024).

158. Гришаев, А. К. Особенности управления предприятием в условиях цифровизации / А. К. Гришаев // Экономика и предпринимательство. 2021. № 6(131). С. 1365-1369. DOI 10.34925/EIP.2021.131.6.265.

159. Макеев Н.Н. Об одном классе точных решений уравнений Навье-Стокса /Сборник аспирантских работ Математика. Механика. Физика // Казань: Издательство Казанского университета, 1964. С.123-127.

160. Todd, S. & Sands, N.P. & Strobhar, David. (2017). Plug the holes in the Swiss cheese model. Chemical Engineering Progress. 113. pp. 46-50.

161. Stauffer, Todd & Clarke, Peter. (2015). Using alarms as a layer of protection. Process Safety Progress. 35. 10.1002/ prs.11739. [Электронный ресурс]: - URL: <https://www.exida.com/articles/UsingAlarmsasaLayerofProtection.pdf> (дата обращения: 15.07.2025)

162. Patel D., Whitehead R. Designing and Validating a Safety Instrumented System (SIS) and its Role in Process Safety Management/ Process Safety Management Summit Asia 2014 // Lumpur Kuala, Malaysia (2014). 14 p.

163. Шубин В. С. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств. / В. С. Шубин, Ю. А. Рюмин // М.: Химия, КолосС. 2006. 359 с.

164. Методическое и программное обеспечение для оценки надежности и безопасности функционирования химико-технологического оборудования: монография / Т. Н. Швецова-Шиловская, В. Б. Кондратьев, В. Г. Горский, А.

Ф. Егоров, О. В. Полехина, Т. В. Громова, Т. В. Гамзина, А. А. Афанасьева, Т. В. Савицкая, Д. И. Назаренко, Д. Е. Иванов, М. А. Викентьева. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2016. 372 с.

165. Мешалкин В. П. Модели представления знаний о процедуре технической диагностики отказов теплообменных аппаратов/ В. П. Мешалкин, Л. В. Гурьева, Б. Е. Сельский // Теоретические основы химической технологии. 1998. Т. 32. №2. С. 201–207.

166. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника. 2000. 248с.

167. Можаяев А.С. Теория и практика автоматизированного структурно-логического моделирования систем. // Доклады международной конференции по информатике и управлению. (IC1 & C') Том 3. СПб.: СПИИРАН. 1997. С. 1109-1118.

168. Егоров А. Ф. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств/ А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая // М.: КолосС. 2010. 526 с.

169. Кузнецов П. К вопросу учета опасностей при анализе надежности АСУ ТП опасных производств. / П. Кузнецов, Я. Тынченко, В. Колесник// Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economies. Management, 1(1), (2022). 0217-0228. DOI 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0217-0228

170. Егоров А. Ф. Информационная система анализа надежности оборудования и химико-технологических систем с использованием веб-технологий / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, С. А. Никитин // Прикладная информатика. 2016. Т. 11, № 4(64). С. 30-41.

171. Егоров А. Ф. Программные средства анализа риска и тяжести последствий аварий на опасных производственных объектах / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, М. Г. Кошкина, Н. В. Крапчатова // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: обзорная информация. 2008. №4. 100 с.

172. ПК АРБИТР [Электронный ресурс]: Сайт компании СЗМА - URL: <https://szma.com/arbitr/> (дата обращения 20.07.2024)

173. Бахметьев А.М. Отчет о научно-исследовательской работе "Верификация и обоснование программы CRISS 4.0 для моделирования и анализа систем безопасности ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности". Часть 1 (Заключительная редакция). / А.М. Бахметьев, И.А. Былов, Ю.В. Милакова // - Нижний Новгород: ФГУП ОКБМ им. И.И.Африкантова. 2005. 88 с.

174. Подсистема обеспечения надежности РЭС АСОНИКА-К. [Электронный ресурс]: – URL: <http://asonika-k.ru> (дата обращения: 08.05.2024).

175. Reliability Software from Isograph — World leaders in Reliability, Maintenance and Safety. [Электронный ресурс]: - URL: [http:// www.isograph-software.com/](http://www.isograph-software.com/) (дата обращения: 08.05.2024)145.

176. Risk Spectrum PSA Professional 1.20 / Theory Manual/ RELCON AB. 1998. 57р.

177. Можаяев А.С. Оценка надежности системы из элементов с тремя состояниями с использованием ПК АРБИТР / А.С.Можаяев, А.А.Нозик, А.В.Струков// Тр. СПИИРАН. 31 (2013). С. 123–146

178. Ляпунцова Е. В. Стандартизация и управление качеством продукции в новых условиях формирования шестого технологического уклада / Е. В. Ляпунцова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 267-270. DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-267-268.

179. ISO 9000 vs. Six Sigma: A Visual Guide / Shuba Kathikeyan // Электронный ресурс]: - URL: <https://www.edureka.co/blog/iso-9000-vs-six-sigma-a-visual-guide/> (дата обращения: 08.05.2024).

180. Tomar, Deepak. TQM, ISO 9000, Six Sigma and CMMI Project Management in Business and Technology. Software Engineering. 2020. N9(1): pp. 1-8. DOI 10.5923/j.se.20200901.01.

181. Yu, C.K. & Su, L.-P. (2019). Integrating six sigma and lean production into ISO 9000 quality management system. *Journal of Quality*. N26. pp. 92-113. DOI 10.6220/joq.201904_26(2).0002.

182. Попкова Е. Г. ESG-менеджмент качества в цифровом бизнесе России с опорой на ответственные инновации и институты информационного общества/ Е. Г. Попкова, А. А. Соловьев, А. С. Сметанин // На страже экономики. 2023. № 1. С. 82 - 89. DOI 10.36511/2588- 0071-2023-1-82-89.

183. Управление качеством продукции на предприятиях ОПК с использованием инновационных технологий / В. Б. Афанасьев, В. М. Медведев, С. Н. Остапенко [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 12. С. 3-10.

184. Каримов, Р. Н. Комбинированный метод оценки параметров скрытых периодичностей / Р. Н. Каримов, А. А. Большаков, О. В. Червякова // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управлений: Межвузовский научн. сборник. - Саратов: СГТУ. 1996. С. 82-89.

185. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М.:Мир. 1973. 957 с.

186. Кислякова, Е. В. Концепция "Дом качества" как инструмент комплексной оценки и улучшения качества продукции / Е. В. Кислякова // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7(133). С. 81-84.

187. Заблочкая, В. Н. Оценка качества древесных гранул с помощью инструмента «Дом качества» / В. Н. Заблочкая, С. С. Мандыбура // Управление качеством в образовании и промышленности : Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, Севастополь, 21–22 мая 2020 года / Редколлегия: Белая М.Н. (отв. ред.). - Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет". 2020. С. 141-146.

188. Чабаненко, А. В. Разработка и применение программы для структурирования функций качества «ДОМ качества QFD» / А. В. Чабаненко

// Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXIV Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 31 мая – 04 2021 года. Том Часть 3. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 330-336.

189. Шинкевич, А. И. Проектирование продукции на платформе PLM: метод структурирования функции качества QFD / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, Д. В. Харитонов // Компетентность. 2023. № 3. С. 50-54. DOI 10.24412/1993-8780-2023-3-50-54.

190. Макаров Р. И. Современная система управления качеством на предприятии и технологии обеспечения ее развития / Р. И. Макаров, С. А. Огрызков, Е. А. Отцова [и др.] // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2002. № 7. С. 135-139.

191. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1979. 15 с.

192. ГОСТ 16504-81 Испытания и контроль качества продукции. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1981. 28 с.

193. Создание систем качества. [Электронный ресурс]: - URL: <http://Standard.ru> (дата обращения 21.08.2025)

194. Фролов, В. Г. Анализ инновационно-инвестиционной сбалансированности промышленной политики России в условиях цифровой трансформации с применением методов искусственного интеллекта / В. Г. Фролов, В. И. Перова // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13, № 1. С. 127-148. DOI 10.18334/vines.13.1.117247.

195. Di Tollo, G., Tanev, S., Slim, K.M., and De March, D. (2014). Determining the Relationship Between Cocreation and Innovation by Neural Networks // Complexity in Economics: Cutting Edge Research, pp. 49–62. [Электронный ресурс]: - URL: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05185-7_3. (дата обращения 21.08.2025)

196. Li, D., Liang, LQ. & Zhang, WJ. Defect inspection and extraction of the mobile phone cover glass based on the principal components analysis. *Int J Adv Manuf Technol* **73**, pp. 1605–1614 (2014). DOI 10.1007/s00170-014-5871-y
197. Смирнова, Е. К. Основные аспекты методологии системы менеджмента качества / Е. К. Смирнова // Интерактивная наука. 2017. № 3(13). С. 168-172. DOI 10.21661/r-118251.
198. Грабауров В.А. Информационные технологии для менеджеров. – М.: Финансы и статистика, 2001. 368с.
199. Макаров Р. И. Модели системы менеджмента качества производства полированного стекла / Р. И. Макаров, Е. Р. Хорошева, Ю. М. Попов, В. В. Тарбеев // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2002. № 7. С. 131-134.
200. Тарбеев В. В. Имитационное моделирование в системе управления качеством листового стекла / В. В. Тарбеев, А. В. Молодкин, Е. Р. Хорошева, А. В. Васильев // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2004. № 9-2. С. 47-51.
201. 171. Корецкая, Л. К. Факторы оптимизации хозяйственных рисков в стекольной отрасли / Л. К. Корецкая, А. М. Губернаторов // Казанская наука. 2014. № 4. С. 76-81.
202. Ковылкин, Д. Ю. Возможности современных инструментальных средств моделирования бизнес-процессов / Д. Ю. Ковылкин, В. Н. Новикова, С. В. Ратафьев // Креативная экономика. 2019. Т. 13. № 7. С. 1457-1474. DOI 10.18334/ce.13.7.40847.
203. ARIS Express: [Электронный ресурс]: Сайт компании ARIS - URL: <https://bpmssoft.org/aris-express/> (дата обращения 21.08.2025)
204. Bizagi Business Process Management Suite: [Электронный ресурс]: Сайт компании Bizagi - URL: <http://www.b-k.ru/products/bizagi/> (дата обращения 21.08.2025)

205. Bizagi Modeler: [Электронный ресурс]: Сайт компании Bizagi - URL: <https://bpmn2.ru/blog/poshagovoe-rukovodskto-bizagi-modeler> (дата обращения 21.08.2025)

206. Ковылкин, Дмитрий & Новикова, Василиса & Ратафьев, Сергей. (2019). Возможности современных инструментальных средств моделирования бизнес-процессов. Creative Economy. N13. pp. 1457-1473. 10.18334/ce.13.7.40847.

207. Draw.io: [Электронный ресурс]: Сайт компании draw.io - URL: <https://draw-io.ru.softonic.com/> (дата обращения 21.08.2025)

208. ELMA Business Process Management: [Электронный ресурс]: Сайт компании ELMA - URL: <http://crm74.ru/page/elma-bpm> (дата обращения 21.08.2025)

209. Gliffy: [Электронный ресурс]: Сайт компании Gliffy - URL: http://fevt.ru/load/gliffy_diagrams/104-1-0-839 (дата обращения 21.08.2025)

210. Visual Paradigm: [Электронный ресурс]: Сайт компании Visual Paradigm - URL: <http://analyst.by/articles/vpforum18> (дата обращения 21.08.2025)

211. Business Studio: [Электронный ресурс]: Сайт компании Современные технологии управления - URL: <https://www.businessstudio.ru/> (дата обращения 21.08.2025)

212. Зимина Л. В. Особенности использования BPM-систем в автоматизации процессов управления бизнесом на стратегическом уровне / Л. В. Зимина // Технологические тренды и модели цифровой трансформации экономики / под ред. Л.И. Малявкиной. – Орел: Орловский государственный университет экономики и торговли, 2020. С. 55-71.

213. Усманова, А. Р. Формирование научно-исследовательских компетенций инженеров на основе цифровых технологий моделирования / А. Р. Усманова, Р. Ф. Маликов, А. Р. Исхаков // Инженерное образование. 2019. № 26. С. 56-65.

214. Шматков Р. Н. Вопросы оптимизации процессов на непрерывном производстве/ Р. Н. Шматков, Е. И. Сырмолов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. 2022. № 4 (15). С.80–86. DOI 10.52170/2618-7949_2022_15_80.

215. Губернаторов А. М. Преобразование стекольной промышленности: переход от традиционных бизнес-моделей к новым цифровым платформам / А. М. Губернаторов // Вестник Академии знаний. – 2019. № 33(4). С. 94-99.

216. Макаров Р. И. Особенности внедрения цифровой экономики на стекольных заводах России / Р. И. Макаров, Е. Р. Хорошева // Стекло и керамика. 2018. № 11. С. 26-29.

217. Berger, G., Raonic, Z., Forthuber, D., Raupenstrauch, H. and Hermann, R. (2022) Energy and Material Flow Evaluation with CO2 Emissions in the Glass Production Process. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, N12, pp. 82-105. DOI: [10.4236/ampc.2022.125007](https://doi.org/10.4236/ampc.2022.125007)

218. Scott Colangelo (2024). Reducing the environmental footprint of glass manufacturing. *International Journal of Applied Glass Science*. N15. pp. 350-366. DOI 10.1111/ijag.16674.

219. Furszyfer Del Rio, Dylan & Sovacool, Benjamin & Foley, Aoife & Griffiths, Steve & Bazilian, Morgan & Kim, Jinsoo & Rooney, David. (2021). Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. N155. 111885. DOI 10.1016/j.rser.2021.111885.

220. Zier, Michael & Stenzel, Peter & Kotzur, Leander & Stolten, Detlef. (2021). A Review of Decarbonization Options for the Glass Industry. *Energy Conversion and Management*: X. 10. 100083. DOI 10.1016/j.ecmx.2021.100083

221. Prescott, Patrick & Purnode, Bruno & Richet, Pascal & Conradt, Reinhard & Takada, Akira & Dyon, Joël. (2021). *Simulation in Glass Processes*. pp. 111-126. DOI 10.1002/9781118801017.ch1.7.

222. Хорошева Е Р Автоматизация производства листового стекла (флоат-способ) / Р.И. Макаров , Е.Р.Хорошева, С.А. Лукашин / - Владимир Владим гос ун-т. 2001. 242 с.

223. Барбасова Т. А. Автоматизационная система управления эффективностью доменной плавки / Т. А. Барбасова, С. А. Черепанова, Е. В. Бауман, П. А. Самолетова // НАУКА ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 74-й научной конференции, Челябинск, 19 апреля 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2022. С. 168-173.

224. Wirtz, Marco & Hahn, Maria & Schreiber, Thomas & Mueller, Dirk. (2021). Design optimization of multi-energy systems using MILP: Which model complexity and level of detail is sufficient?. Energy Conversion and Management. N240. 114249. DOI 10.1016/j.enconman.2021.114249.

225. M. Sameti, F. Haghighat, Optimization approaches in district heating and cooling thermal network, Energy and Buildings 140 (2017) pp. 121–130. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.01.062.

226. G. Mavromatidis, K. Orehounig, L. A. Bollinger, M. Hohmann, J. F. Marquant, S. Miglani, B. Morvaj, P. Murray, C. Waibel, D. Wang, J. Carmeliet, Ten questions concerning modeling of distributed multi- energy systems, Building and Environment 165. (2019). 106372. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.106372.

227. Разумов Д. А. Методика многокритериальной оптимизации портфеля проектов больших сложных систем / Д. А. Разумов, В. В. Малышев // Автоматизация в промышленности. 2023. № 5. С. 36-43. DOI 10.25728/avtprom.2023.05.09.

228. Малышев В. В. Концепция имитационной модели для проектирования автоматизированной системы управления космодромом / В. В. Малышев, Д. А. Разумов // Информация и космос. 2019. № 2. С. 56-67.

229. Расширенный метод "уверенных суждений" при выборе многокритериальных решений в условиях многоцелевого подхода / В. С.

Брусов, П. О. Корчагин, В. В. Малышев, С. А. Пиявский // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2020. № 1. С. 96-108. DOI 10.31857/S0002338820010047.

230. Калугин А.И. Оптимизационный эксперимент в среде AnyLogic // Наука и школа. 2015. №4. [Электронный ресурс]: - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsionnyy-eksperiment-v-srede-anylogic> (дата обращения: 19.10.2024).

231. Эксперимент по оптимизации поддерживает два механизма оптимизации: Генетический и OptQuest / [Электронный ресурс] // Anylogic : [сайт]. - URL: <https://anylogic.help/anylogic/experiments/optimization.html> (дата обращения: 19.10.2024).

232. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников // М.: Наука, 1981. 114с.

233. Соболев И.М., Статников Р.Б. Наилучшие решения - где их искать? - М.: Знание. 1982. 64с.

234. Резчиков А.Ф. Оптимизация структур роботизированных комплексов дуговой сварки / А.Ф. Резчиков, В.А. Иващенко, Д.Ю. Петров // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1998. №6. С.60-65.

235. Управление смешением бензинов в условиях параметрической неопределенности / С. С. Горбунов, А. В. Костандян, А. Ф. Егоров, В. В. Сидоров // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 2. С. 11-14. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_2_11.

236. Технология стекла: Справочные материалы / ред.: П. Д. Саркисов, В. Е. Маневич, В. Ф. Солинов, К.Ю. Субботин. - Москва: ИПК «Чувашия». 2012. 647 с.

237. Строганова, Е. С. Производство стекла / Е. С. Строганова, А. Ю. Санжаровский // Энциклопедия технологий 2.0: Производство неметаллов. - Москва; Санкт-Петербург: Научно-исследовательский институт "Центр экологической промышленной политики". 2022. С. 87-206.

238. Автоматизированные системы управления производством стекла / О.Ф. Кучеров, В.Е. Маневич, В.В. Клименко// - Л.: Стройиздат. 1980. 178 с.
239. Бондарев К.Т. Листовое полированное стекло. М.: Стройиздат. 1978. 167 с.
240. Маневич В.Е. Сырьевые материалы, шихта и стекловарение / В. Е. Маневич, К. Ю. Субботин, В. В. Ефременков. - Москва : Стройматериалы, 2008. 223 с.
241. Жималов А. Б. Синтетические сырьевые материалы для производства флоат-стекла / А. Б. Жималов, И. Н. Горина, Л. Н. Бондарева [и др.] // Стекло и керамика. 2010. № 8. С. 24-26.
242. Боровский Д. Н. Тонкое измельчение стеклобоя в планетарной мельнице / Д. Н. Боровский, А. А. Гарабажиу, О. А. Петров, Д. В. Семененко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2020. № 3. С. 35-38.
243. Байнева И. И. Автоматизированная система управления технологией стекловаренного производства / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 12. С. 20-26.
244. Байнева И. И. Автоматизация технологии производства стекла для светотехнической промышленности / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 4. С. 27-34.
245. Байнева И. И. Система управления стекольным производством в светотехнической промышленности / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 12(225). С. 45-51. DOI 10.14489/hb.2015.12.pp.045-051.
246. Джашигов В.Э. Математическая модель динамических тепломассообменных процессов в стекловаренной печи / В.Э. Джашигов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков // Инженерно-физический журнал. 2003. Т.76, № 5. С.117-124.
247. Куранов С. В. Построение системы нечеткого вывода для управления технологическим процессом варки стекла / С. В. Куранов, В. А.

Иващенко // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 2, № 1(65). С. 144-149.

248. Барышникова Е.С. Система ситуационного управления производством листового стекла / Е.С. Барышникова, В.А. Иващенко // Вестник СГТУ. 2009. № 2 (38). Вып. 1. С. 91-96.

249. Куранов С. В. Использование системы нечеткого вывода для повышения точности измерения уровня стекломассы в ванной печи / С. В. Куранов, В. А. Иващенко, О. А. Крайнов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 4, № 1(68). С. 181-185.

250. Панасик В. А. построение моделей по режимам потребления газа для исследования износа футеровки печного оборудования / В. А. Панасик // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 частях, Гомель, 27–28 апреля 2023 года. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 2023. С. 174-177.

251. Мокляченко А. В. Формализация задачи управления технологическим процессом производства листового стекла флоат-способом / А. В. Мокляченко, Р. И. Макаров // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2010. № 15. С. 118-123.

252. Шенец Е. Л. Комплексная оценка регулировочной способности энергоэффективности предприятия по производству листового стекла / Е. Л. Шенец // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 59-70.

253. Zhdaniuk Nataliia & Plemiannikov Oleksii. (2024). Simulation of the work of glass furnaces with the purpose of searching for reserves and increase their efficiency. Technology audit and production reserves. N3. pp.40-46. DOI 10.15587/2706-5448.2024.307613.

254. Цапар Віталій & Жученко Олексій. (2015). Mathematical modeling of basic physical and chemical processes in the production of glass. Eastern-

European Journal of Enterprise Technologies. N1. DOI 10.15587/1729-4061.2015.36069.

255. Сайт компании Pilkington [Электронный ресурс]: Step-by-step Manufacturing of Float Glass. – URL: Step-by-step Manufacturing of Float Glass.– URL:<http://www.pilkington.com/pilkington-information/about%2Bpilkington/education/float%2Bprocess/step%2Bby%2Bstep.htm> (дата обращения: 19.10.2024).

256. Бондарев К.Т. Листовое полированное стекло. - М.: Стройиздат. 1978. 167с.

257. Shelbyy, James. Introduction to Glass Science and Technology. (2005) DOI 10.1039/9781847551160-FP00

258. Кучеров О.Ф. Автоматизированные системы управления производством стекла. / О.Ф. Кучеров, В.Е. Маневич, Клименко В.В. Клименко// - Л.: Стройиздат. 1980. 178 с.

259. Oro, Jesús & Díaz, K. & Santolaria, Carlos & Hedilla, A. & Lemaille, M.. (2008). Multiphase Modelling of Pouring Glass Over the Spout Lip of an Industrial Float in the Flat Glass Forming Process. International Journal for Numerical Methods in Fluids. N58. pp.1147 - 1177. DOI:10.1002/fld.1793

260. Юнева Е. В. Взаимосвязь оптических свойств флоат-стекла и технологических параметров производства /Е. В. Юнева, Т. В. Каплина, В. А. Гороховский// Стекло мира. 2006. № 6. С. 81-83.

261. Юнева Е. В. Улучшение оптических свойств флоат-стекла / Е. В. Юнева, А. В. Гороховский, Т. В. Каплина // Стекло и керамика. 2006. № 11. С. 3-5.

262. Попов В.В. О растекании расплавленного стекла по поверхности жидкого олова // Физика и химия стекла. 1981. Т.7. №6. С. 717-722.

263. Гликман М.Л. Математическое описание процесса формования стекла при повышении производительности ванны и постановка задачи для решения на ЭВМ/ М.Л. Гликман, А.С. Махновецкий, Н.Д. Винник //

Стекловарение и формование листового стекла: Сб. науч. тр. М.: ВНИИтехстройстекло, 1982. С. 40-50.

264. Narayanaswamy, O.. (2006). Computer Simulation of Float Glass Stretching. Journal of the American Ceramic Society. N64. pp.666 - 670. DOI 10.1111/j.1151-2916.1981.tb15867.x.

265. Choudhary M.K, Venuturumilli R, Hyre MR, Mathematical modeling of flow and heat transfer phenomena in glass melting, delivery, and forming processes. Int J Appl Glas Sci. [Internet]. 2010; N1(2). pp.188–214. Available from [Электронный ресурс]: - URL: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.2041-1294.2010.00018.x>. (Дата обращения 21.04.2021).

266. Кушников В.А. Задачи, модели и алгоритмы системы управления производством листового стекла/ В.А.Кушников, М.А.Щербаков // УБС. 2014. №48. С.198-224.

267. Modeling and Simulation of Float Glass Forming Process / Miroslav Tuma // “Models, Simulation, Optimization: Mathematical Technologies for Industrial Innovation in Europe” Rome, Italy 19-21 December 2016 Accademia dei Lincei. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.academia.edu/105580046/European_Success_Stories_in_Industrial_Mathematics (Дата обращения 21.04.2025).

268. Numerical Modeling of Glass Pouring Process at the Tin Bath Entry with Different Geometry / Luyao Li, Zhongxi You, Huey-Jiuan Lin, Jianjun Han, Jian Ruan, Xiujian Zhao // MATERIALS TRANSACTIONS. 2019 Volume 60 Issue 11 Pages 2442-2450 DOI [Электронный ресурс]: - URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2019151> (Дата обращения 21.04.2025).

269. Марголис Б. И. Автоматизированная система моделирования процессов отжига сортового стекла / Б. И. Марголис, Г. А. Мансур // Математические методы в технике и технологиях ММТТ. 2019. Т. 8. С. 119-124.

270. Марголис Б. И. Определение постоянных структурной релаксации при моделировании отжига сортового стекла / Б. И. Марголис, Г. А. Мансур,

Е. А. Камолова // Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: Сборник научных трудов / под ред. Т.Б. Новиченковой. Том Ч.2. - Тверь: Тверской государственный технический университет. 2019. С. 178-184.

271. Андрианова В. И. Контроль качества закаленного автомобильного стекла / В. И. Андрианова, Б. И. Марголис // Динамика сложных систем - XXI век. 2019. Т. 13. № 1. С. 61-64. DOI 10.18127/j19997493-201901-10.

272. Марголис Б. И. Программы моделирования и идентификации температурных полей в сортовых стеклоизделиях / Б. И. Марголис, Г. А. Мансур // Программные продукты и системы. 2020. № 1. С. 119-124.

273. Lalykin, N. V. Selecting the highest annealing temperature for glass strip / N. V. Lalykin, A. S. Makhnavetskii // Glass and Ceramics. 1981. Vol. 38, N5. pp. 226-228. DOI 10.1007/BF00701576.

274. Lalykin, N. V. Calculating the optimum parameters for the annealing of flat glass / N. V. Lalykin, O. V. Mazurin // Glass and Ceramics. 1985. Vol. 42, N3. pp. 129-133. DOI 10.1007/BF00698687.

275. Ding, P.; Yang, L. Glass Defect Detection with Improved Data Augmentation under Total Reflection Lighting. Appl. Sci. 2024, 14, 5658. <https://doi.org/10.3390/app14135658>

276. Иващенко Ю. Г. Диэлектрический метод управления рецептурно-технологическими параметрами при получении силикатнатриевых материалов / Ю. Г. Иващенко, М. П. Кочергина, А. Б. Жималов, А. А. Жималов // Стекло и керамика. 2020. № 12. С. 13-19.

277. Каплина, Т В Метод обнаружения оловосодержащих микровключений в теплопоглощающем стекле /Т В Каплина, В А Гороховский, Е В Юнева // Сб докл П-й Междунар конфер «Стеклопрогресс-XXI» - Саратов. 2004. С. 169-171.

278. Харазов В. Г. Информационная система диагностики нарушений в производстве кварцевого стекла / В. Г. Харазов, Г. А. О. Аль //

Математические методы в технике и технологиях ММТТ. 2019. Т. 6. С. 61-65.

279. Хасцаев Б. Д. Импедансный метод изучения и диагностики дефектов оптического стекла и устройство его реализации / Б. Д. Хасцаев, А. Л. Королев // Инновации и инвестиции. 2018. № 5. С. 207-214.

280. Макаров Р. И. Аксиоматический анализ контроля качества безопасного многослойного стекла в производстве / Р. И. Макаров // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2015. № 2(31). С. 72-76.

281. Казьмина О. В. Возможные виды брака в технологии стекла и способы их устранения / О. В. Казьмина, Р. Г. Мелконян. - Томск: Томский политехнический университет. 2015. 129 с.

282. Аль Гурайбави, А. О. Автоматизация обнаружения дефектов поверхности трубок из кварцевого стекла / А. О. Аль Гурайбави, Л. А. Русинов // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2023. Т. 1. С. 180-183.

283. Laser cutting of float glass during production / A. B. Zhimalov, V. F. Solinov, V. S. Kondratenko, T. V. Kaplina // Glass and Ceramics. 2006. Vol. 63, N9-10. pp. 319-321. DOI 10.1007/s10717-006-0112-y.

284. Голубятников, И. В. Развитие теории и практики метода лазерного управляемого термораскалывания / И. В. Голубятников, В. С. Кондратенко, А. Б. Жималов // Приборы. 2009. № 12(114). С. 1-6.

285. Ковалёв Г.А. Комплексные логистические решения для предприятия стекольной промышленности // Вестник РГЭУ РИНХ. 2014. №2 (46). С.62-68.

286. Куликова М.В. Современные тенденции и дистрибуция в стекольной промышленности // Инновационная деятельность. 2011. №4 (17). Вып. 1. С. 45-49.

287. Листовые строительные стёкла с защитно-декоративными покрытиями / Н. И. Бондаренко, Д. О. Бондаренко, Д. В. Кочурин [и др.] // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2, № 1. С. 11-16.

288. Энерго- и ресурсосберегающая технология получения декоративных покрытий на листовых стеклах / В. С. Бессмертный, Н. И. Бондаренко, Д. О. Бондаренко [и др.] // Стекло и керамика. 2020. № 4. С. 44-47.

289. Направления оптимизации технологического нормирования производства тарного стекла: наилучшие доступные технологии, нормы общего действия и углеродоемкость продукции / Т. В. Гусева, И. О. Тихонова, В. Н. Цевелев [и др.] // Стекло и керамика. 2021. № 10. С. 18-23.

290. Мешалкин В. П. Научные методы инжиниринга энергоресурсоэффективных интенсивных химико-технологических систем в условия цифровой экономики // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2021. №8. С. 6-23.

291. Хорошева Е. Р. Теоретические основы построения интегрированных систем управления промышленных предприятий (на примере стекольных заводов): специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Хорошева Елена Руслановна. – Владимир. 2007. 328 с.

292. Васильев А.В. Использование моделирования для контроля качества производимого стекла./ А.В. Васильев, Е.Р. Хорошева, М.В. Щукин // Glass Ceram. 2006. N 63, pp.339-341. DOI 10.1007/s10717-006-0117-6

293. Хорошева Е Р Анализ структурных свойств системы управления качеством // Вестник Костромского государственного университета Т 12 [Серия технические и естественные науки «Системный анализ Теория и практика»]. 2006. №2 С. 89-93.

294. Хорошева Е. Р. Использование моделирования для управления качеством вырабатываемого стекла / А. В. Васильев, Е. Р. Хорошева, М. В.Щукин // Стекло и керамика. 2006. №10. С. 22-24.

295. Системный анализ безопасного обращения химической продукции: методы и подходы к прогнозированию и классификации опасностей / П. Д.

Саркисов, А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47, № 1. С. 26-35. DOI 10.7868/S0040357113010144.

296. Редько, С. Г. Компьютерное моделирование параметров технологического оборудования стеклотарного производства / С. Г. Редько, Е. В. Морозова // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. С. 90-97.

297. Морозова Е. В. Статистические аспекты имитационного моделирования сложных систем технологического оборудования на примере стеклотарного производства / Е. В. Морозова, С. Г. Редько // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 118.

298. Сетецентрические методы управления / В. А. Иванюк, Н. М. Абдикеев, Ф. Ф. Пащенко, Н. В. Гринева // Управленческие науки. 2017. Т. 7. № 1. С. 26-34.

299. Куранов С. В. Системный подход к построению системы автоматизированного управления процессом варки стекла / С. В. Куранов, В. А. Иващенко // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 222.

300. Окислительно-восстановительный потенциал стекломассы и технологические процессы в производстве листового стекла / Р. В. Петухова, И. М. Терещенко, А. П. Кравчук, Е. В. Карпович // Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. 2010. Т. 1. № 3. С. 80-82.

301. Оценка эффектов реализации проектов развития производственной системы (на примере АО "Лыткаринский завод оптического стекла") / М. А. Абдулкадыров, А. Н. Игнатов, Н. Н. Куликова, Е. С. Митяков // Russian Technological Journal. 2023. Т. 11. № 6. С. 76-88. DOI 10.32362/2500-316X-2023-11-6-76-88.

302. Андрианова В. И. Моделирование и управление технологическим процессом закалки стекла для автомобильного транспорта: диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Андрианова Валентина Ивановна. 2023. 121 с.

303. Olavi Uusitalo Analysis of Float Glass' Development by Design Envelope // First presented at Glass Performance Days, June, 28-30, 2017. Tampere, Finland. [Электронный ресурс]: - URL: <https://www.glassonweb.com/article/analysis-float-glass-development-design-envelope> (дата обращения: 15.07.2025)

304. Uusitalo, Olavi & Mikkola, Toni. (2010). Revisiting the case of float glass : Understanding the industrial revolution through the design envelope. European Journal of Innovation Management. N13. pp.24-45. DOI 10.1108/14601061011013212.

305. McGrath, R., MacMillan, I. C. and Tushman, L. M. "The Role of Executive Team Actions in Shaping Dominant Designs: Towards the Strategic Shaping of Technological Progress", Strategic Management Journal. 1992.Vol. 13, pp. 137-161.

306. Барышникова Е. С. Системный подход к разработке системы управления флоат-процессом в аварийных ситуациях / Е. С. Барышникова // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2015. № 6(76). С. 141-143.

307. Marcano, Laura & Haugen, Finn & Sannerud, Arne Ronny & Komulainen, Tiina. (2019). Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? Safety Science. DOI 115. 414-424. 10.1016/j.ssci.2019.02.019. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/331552049_Review_of_simulator_training_practices_for_industrial_operators_How_can_individual_simulator_training_be_enabled (дата обращения: 15.07.2025)

308. Компьютерная система для обучения ресурсосберегающему проектированию процессов вторичной переработки нефти / Д.Н. Фураев, Т.Б. Чистякова // Известия СПбГТИ (ТУ). 2021. №59. С.101-106.

309. Koteleva, Natalia & Kuznetsov, Valentin & Vasileva, Natalia. (2021). A Simulator for Educating the Digital Technologies Skills in Industry. Part One. Dynamic Simulation of Technological Processes. Applied Sciences. N11. pp.10885. DOI 10.3390/app112210885.

310. Moreland, John & Toth, Kyle & Fang, Yuqian & Block, Michelle & Page, Garrett & Crites, Shawn & Zhou, Chenn. (2019). Interactive Simulators for Steel Industry Safety Training. steel research international. 90. DOI 10.1002/srin.201800513. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/331552049_Review_of_simulator_training_practices_for_industrial_operators_How_can_individual_simulator_training_be_enabled (дата обращения: 15.07.2025)

311. Компьютерные тренажеры для тестирования и разработки систем усовершенствованного управления технологическим процессом / И.В. Жуков, М.Д. Хабаров, В.Г. Харазов // Известия СПбГТИ(ТУ). 2017. № 40. С. 111-114.

312. Вместо 19. Kajero, Olumayowa & Chen, Tao & Yao, Yuan & Chuang, Yao-Chen & Wong, David. (2017). Meta-modelling in chemical process system engineering. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. N73. pp.135–145. DOI 10.1016/j.jtice.2016.10.042.

313. Han, Jianjun & Li, Luyao & Wang, Jing & Chen, Shuyong & Liu, Chao & Li, Congyun. (2022). Simulation and evaluation of float glass furnace with different electrode positions. Journal of the American Ceramic Society. 105. DOI 10.1111/jace.18700. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/331552049_Review_of_simulator_training_practices_for_industrial_operators_How_can_individual_simulator_training_be_enabled (дата обращения: 15.07.2025)

314. Результаты поэтапной модернизации и эксплуатации усовершенствованной системы управления (АРС-системы) / И.В. Жуков, В.Г. Харазов // Известия СПбГТИ(ТУ). 2017. № 41. С. 105-112.

315. Hashim, A. & Hussein, Noorhidayah. (2020). Role of Operator Training Simulator (OTS) in Capability Building towards the Fourth Industrial Revolution

(IR 4.0). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. N778. pp.012044. DOI 10.1088/1757-899X/778/1/012044.

316. Боровиков И.Г., Вивчарь Р.М., Волков Н.А., Пачин А.В. Методика использования учебно-тренировочных средств подготовки технологического персонала // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3-1. С. 93-99.

317. Вильвер, П.Ю & Wilwer, P.Yu & Юрин, А.Ю & Yurin, Alexander. (2016). Специализированный программный комплекс «АСТ» для создания тренажеров. Международный журнал Программные продукты и системы. N32. С.136-141. DOI 10.15827/0236-235X.115.136-141.

318. Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для создания сетевых предприятий / Ю.Ф. Тельнов, В.А. Казаков, А.В. Данилов, А.А. Денисов// Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 4. С. 557–571.

319. Beloglazov, Ilia & Petrov, P. & Bazhin, V.. (2020). The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. Eurasian Mining. pp.50-54. DOI 10.17580/em.2020.02.12.

320. Zhu, D., Yin, H., Xu, Y. et al. A Survey of Advanced Information Fusion System: from Model-Driven to Knowledge-Enabled. Data Sci. Eng. (2023). N8, pp.85–97/DOI 10.1007/s41019-023-00209-8

321. Egorov A.F., Savitskaya T.V., Levushkina S.A., Levushkin A.S. Intelligent decision support system for controlling the atmospheric air quality. Theor. Found. Chem. Eng. 2010. 44. N5. pp. 326-338. DOI: 10.1134/S0040579510030127.

322. Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V., Devetyarov A.N. System Analysis of Chemical Reactor as Control Object. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2017. V. 60. N 9. pp. 92-99 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017609.5587.

323. Karanevskaya T.N., Shumikhin A.G. Modeling of Technological Processes for the Purpose of Algorithmization of the Task of Managing Oil Field Treatment Facilities. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim.

Tekhnol.]. 2020. V. 63. N 2. pp. 84-90 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6100.

324. Sarkisov P.D., Egorov A.F., Savitskaya T.V., Bachkala O.V., Kuz'mina Y.A. System analysis of safe chemical handling: methods and approaches to predicting and classifying chemical hazards. Theor. Found. Chem. Eng. 2013. V. 47. N1. pp. 22-30. DOI: 10.1134/S0040579513010119.

325. Макаров Р.И. Особенности внедрения цифровой экономики на стекольных заводах России / Р.И.Макаров, Е.Р.Хорошева // Стекло и керамика. 2018. №11. С. 26-28.

326. Петров Д.Ю., Мешалкин В.П. Модели и методы повышения эффективности энергоресурсоэффективных автоматизированных многостадийных производств высококачественного листового стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 10. С. 124-127.

327. Иващенко В.А., Резчиков А.Ф., Шлычков Е.И. Подход к построению структур автоматизированного управления энергопотреблением промышленных предприятий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 5. С. 53-56.

328. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем: введение в системотехнику химических производств. Уч. пособие для вузов. - М.: Химия. 1974. 344 с.

329. Мешалкин В.П. Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико-технологических систем: учебное пособие. - М.:РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2020. 212 с.

300. Цифровые платформы для автоматизированного управления химико-технологическими системами / В.П. Мешалкин, А.А. Большаков, Д.Ю. Петров // Автоматизация в промышленности. 2023. № 8. С. 45-48.

331. Мешалкин В. П. Архитектура иерархической автоматизированной системы управления многостадийным производством высококачественного конструкционного стекла / В. П. Мешалкин, Д. Ю. Петров // Неорганическая

химия - фундаментальная основа в материаловедении керамических, стеклообразных и композиционных материалов : материалы научной конференции, Санкт-Петербург, 04–05 марта 2016 года. Санкт-Петербург: Издательство "Лема". 2016. С. 143-146.

332. Петров Д. Ю. Подход к моделированию производства листового стекла / Д. Ю. Петров // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2014. № 8(67). С. 264-266.

333. ГОСТ 111—2001. Стекло листовое. Технические условия [Текст]. - М.: Изд-во стандартов. 2001. 21 с.

334. Автоматизация поиска причин аварийных ситуаций при формировании листового стекла /Домнич В.С., Иващенко В.А., Петров Д.Ю. // Проблемы управления. 2011. № 5. С.52–58

335. Булатов В. В. Методика обнаружения пороков стекла с применением камеры технического зрения / В. В. Булатов, И. И. Абакумов, А.А.Кульчицкий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 4(135). С. 163-168.

336. Кафаров В.В., Маневич В.Е., Мешалкин В.П., Чесноков А.Г. Оптимальная структура дозировочно-смесительной линии для приготовления стекольной шихты. // Стекло и керамика. 1981. №12. С.6-7.

337. Крайнов О.А, Петров Д.Ю., Иващенко В.А. Применение искусственных нейронных сетей для исследования влияния свойств сырьевых материалов на температуру и влажность стекольной шихты // ММТТ-23: сб. тр. XXIII междунар. научн. конф.: в 12 т. Т 10. Секция 11. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2010. С.140-142.

338. Ефременков, В. В. Особенности приготовления стекольной шихты в производстве бесцветного листового стекла с повышенной прозрачностью / В. В. Ефременков // Стекло и керамика. 2024. Т. 97. № 3(1155). С. 20-24. DOI 10.14489/glc.2024.03.pp.020-024.

339. Тарбеев В.В., Шепелев Д.Н., Бутняков А.И., Цепелева Т.Г. Производство стекла. - Н.Новгород: ФГУИПП Нижполиграф. 2002. 234с.
340. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB6 / Под ред.Потемкина В.Г. - М.:ДиАЛОГ-МИФИ. 2002. 435с.
341. Мешалкин В. П. Экспертные системы в химической технологии: Основы теории, опыт разработки и применения / В. П. Мешалкин. – М.: Издательство Химия, 1995. 368 с.
342. Мешалкин В.П., Дли М.И., Гимаров В.А. Динамическая классификация сложных технологических систем. Методы, алгоритмы и практические результаты. -М.: Физматлит. 2006. 343 с.
343. Крайнов О. А. Модели анализа качества стекольной шихты на основе искусственных нейронных сетей / О. А. Крайнов, Д. Ю. Петров, П. А. Король // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. Т. 4, № 2(50). С. 79-82.
344. Пилгингтон Э. Б. Флоат-процесс «Великая революция» в производстве стекла / Э.Б. Пилгингтон // Стекло мира. 2000. № 4. С. 60-65.
345. Yan, Jiwang & Zhou, Tianfeng & Masuda, Jun & Kuriyagawa, Tsunemoto. (2009). Modeling High-Temperature Glass Molding Process by Coupling Heat Transfer and Viscous Deformation Analysis. Precision Engineering. N33. pp.150-159. DOI 10.1016/j.precisioneng.2008.05.005.
346. Барышникова Е. С. Системный анализ непрерывных производств на примере производства листового стекла / Е. С. Барышникова, В. А. Иващенко, А. Ф. Резчиков // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024) : Труды Семнадцатой международной конференции, Москва, 24–26 сентября 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова Российской академии наук. 2024. С. 1158-1163.
347. Li, Jianwei. (2025). Thermomechanical Constitutive Equations for Glass and Numerical Simulation / Glass Science - Innovations and Applications [Working Title]. 39 p. DOI 10.5772/intechopen.1008843.

348. Scholze, H. & Claus, Albert. (1992). Glass: Nature, Structure, and Properties. DOI 10.1007/978-1-4613-9069-5. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/331552049_Review_of_simulator_training_practices_for_industrial_operators_How_can_individual_simulator_training_be_enabled (дата обращения: 15.07.2025)

349. Lion, A. & Peters, J. & Kolmeder, Sebastian. (2011). Simulation of temperature history-dependent phenomena of glass-forming materials based on thermodynamics with internal state variables. *Thermochimica Acta - THERMOCHIM ACTA*. N522. pp.182-193. DOI 10.1016/j.tca.2010.12.017.

350. Кондратов, В. И. Развитие флоат-процесса производства листового стекла / В.И. Кондратов, Е.Б. Файнберг, В.С. Безлюдная // *Стекло и керамика*. 2000. № 6. С. 11-14.

351. Кондратов В. И. Особенности формования теплопоглощающего флоат-стекла / В.И. Кондратов, В.С. Безлюдная, А.Л. Иванов // *Стекло и керамика*. 2000. № 9. С. 12-13.

352. Гороховский, В. А. История создания отечественного способа производства термически полированного стекла / В.А. Гороховский // *Сб. докл. 1-й Междунар. конфер. «Стеклопрогресс-XXI»*. Саратов. 2002. С. 15-22.

353. Матвеев М.А., Матвеев Г.М., Френкель Б.Н. Расчеты по химии и технологии стекла. Справочное пособие. - М.: Стройиздат. 1972. 238с.

354. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен. - М.: Мир. 1964. 216с.

355. Батунер Л. М. , Позин М. Е., Математические методы в химической технике. - Л.: Изд-во «Химия». 1971. 824 с.

356. Петров Д.Ю., Сапунков Я.Г. Математическое моделирование формования листового стекла методом флоат-процесса // *Проблемы точной механики и управления: Сб. науч. тр. Саратов: Ин-т проблем точной мех-ки и управления РАН*. 2004. С.102-106.

357. Движение расплава ленты стекла в процессе формования / Н.Н. Макеев, Д.Ю.Петров// *Проблемы и перспективы точной механики и*

управления в машиностроении: Мат. Межд. науч. конф. – Саратов. 2006. С. 117-123.

358. Хартман Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. - М.: Мир. 1970. 720с.

359. Матвеев Н.М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. - Минск: Высшая школа. 1974. 766 с.

360. Крайнов О.А., Петров Д.Ю., Резчиков А.Ф. Структура единой информационно-аналитической системы управления производством листового стекла // ММТТ-21: сб. тр. XX1 междунаро. научн. конф.: в 10 т. Т 6. Секции 12,13. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2008. С.263-266.

361. Кросс-платформенная библиотека численного анализа ALGLIB [Электронный ресурс]: Большаков С. Многослойные нейронные сети обратного распространения. – URL: <http://alglib.sources.ru/dataanalysis/neuralnetworks.php> (дата обращения: 15.07.2025)

362. V.P. Meshalkin, A.A. Bol'shakov, D.Yu. Petrov, O.A. Krainov, Algorithms and software quality management glass batch using artificial neural networks // Theor. Found. Chem. Eng. 2012. V 46. N3. pp. 329–332. [Алгоритмы и комплекс программ управления качеством стекольной шихты с использованием искусственных нейронных сетей / В. П. Мешалкин, А. А. Большаков, Д. Ю. Петров, О. А. Крайнов // Теоретические основы химической технологии. 2012. Т. 46. № 3. С. 329-332.]

363. Захаров Ю. А. Моделирование в среде MathCAD движения расплава ленты стекла в процессе формования / Ю. А. Захаров, Д. Ю. Петров // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 12-1. С. 119-125. DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2022_12_119.

364. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» Цифровая подстанция. 2019. № 12. С. 20–25. [Электронный ресурс]. – URL:

http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/09/cifrovye_dvyinii.pdf

(Дата обращения: 28.05.2020)

365. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. - М.: ООО «АльянсПринт». 2020. 401 с.

366. Крыгина И. Е. Современные тенденции развития стекольной промышленности в Российской Федерации // Стратегии бизнеса. 2019. № 3(59). С. 37-39.

367. Stacking technology - good stacking means better glass / [Электронный ресурс] // Grenzebach: [сайт]. - URL: <https://www.grenzebach.com/en/markets/glass/production-technologies/stacking-technology/> (дата обращения: 21.11.2024).

368. ГОСТ Р 60.0.0.2-2016 Роботы и робототехнические устройства. Классификация. - М.: Стандартиформ. 2016. 11с.

369. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. - М.: Мир. 1989. 622 с.

370. Бахман В. А., Королева А. Н., Царегородцев Е. Л. Обзор видов и анализ современного состояния рынка промышленных роботов-манипуляторов // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 2(128). С. 1-7.

371. ГОСТ Р 60.3.3.1-2016/ИСО 9283:1998 «Роботы промышленные манипуляционные. Рабочие характеристики и соответствующие методы тестирования». - М.: Стандартиформ. 2016. 48 с.

372. Shinde, Ravindra & Ohol, Shantipal. (2022). The Performance Parameter Analysis and Calibration Methodology for the Industrial Robot. International Journal of Engineering Sciences. 15. DOI 10.36224/ijes.150202. [Электронный ресурс] - URL: <https://www.grenzebach.com/en/markets/glass/production-technologies/stacking-technology/> (дата обращения: 21.11.2024).

373. Kumičáková, Darina & Tlach, Vladimír & Císar, Miroslav. (2016). Testing the Performance Characteristics of Manipulating Industrial Robots.

Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series. N62. pp.39-50. DOI 10.22223/tr.2016-1/2009.

374. Петров Д. Ю. Интерактивная многокритериальная оптимизация структур роботизированных технологических комплексов дуговой сварки: специальность 05.13.07 «Автоматизация технологических процессов и производств»: Диссертация на соискание кандидата технических наук / Петров, Д. Ю.; СГТУ. — Саратов, 2000. — 128 с.

375. Thomas, M.J., Joy, M.L. & Sudheer, A.P. Kinematic and Dynamic Analysis of a 3-PRUS Spatial Parallel Manipulator. Chin. J. Mech. Eng. N33:13, 17p. (2020). DOI 10.1186/s10033-020-0433-8

376. Киселев С. В., Антонов А.В., Фомин А.С. Роботы параллельной структуры с круговой направляющей: систематический обзор кинематических схем, методов синтеза и анализа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 1. С. 26-38.

377. Чабанный, А. А. Надежность промышленных роботов / А. А. Чабанный. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2015. № 2 (82). С. 226-229.

378. Testing the Performance Characteristics of Manipulating Industrial Robots. Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series. N62. pp.39-50. DOI 10.22223/tr.2016-1/2009.

379. Петров Д. Ю. Надежность манипуляционных роботов / Д. Ю. Петров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. Т. 3, № 1(26). С. 71-82. [https://lib.sstu.ru/doc/ibo/vestniki/2007/03\(26\)-2007_03.pdf](https://lib.sstu.ru/doc/ibo/vestniki/2007/03(26)-2007_03.pdf).

380. Denavit J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices/ J.Denavit, R.S.Hartenberg // Journal of Applied Mechanics. 1955. V.77. pp.215-221.

381. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии / П.С. Александров.- М.:Наука. 1968. 912с.

382. Paul R.P. Kinematic control equations for simple manipulators/ R.P.Paul, B.E.Shimano, G.Mayer // IEEE Trans. Systems. - M.Cybern. SMC-11, 1981. №.6. P.449-455.

383. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н.Бронштейн, К.А.Семендцев. - М.:Наука. 1986. 544с.

384. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Наука. 1968. 720с.

385. Прохоров Ю.В. Теория вероятностей / Ю.В. Прохоров, Ю.А. Розанов. - М.: Наука. 1967. 406с.

386. Заде Л. Лингвистические переменные / Л. Заде. - М.:Мир. 1975. 354с.

387. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. - М.:Мир. 1976. 435с.

388. Методы контроля дефектов листового стекла / И.В. Ефимов Д.Ю.Петров // Проблемы управления, передачи и обработки информации – АТМ-2011: сб. трудов Междунар. науч. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2011. С.297-302.

389. P.D. Sarkisov, O.B. Butusov, V.P. Meshalkin, V.G. Sevast'yanov, A.B. Galaev, Computer-aided method of analysis of nanocomposite structure on the basis of calculations of isolines of fractal dimensionality // Theor. Found. Chem. Eng. 2011, Vol. 45, No. 1, pp. 3–14. [Саркисов П.Д., Бутусов О.Б., Мешалкин В.П., Севастьянов В.Г., Галаев А.Б. Компьютерные инструментальные средства молекулярной инженерии и вейвлетно-морфометрический анализ текстуры наноматериалов // Теорет. основы хим. технологии. 2011. Т.45. №1. С.3-14.

390. Алгоритмическое обеспечение классификации точечных дефектов листового стекла / И. В. Ефимов, В. А. Иващенко, Д. Ю. Петров, В. П. Мешалкин // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 144.

391. P.D. Sarkisov, O.B. Butusov, V.P. Meshalkin, Computer-aided tools for molecular systems engineering and wavelet-morphometric analysis of the texture of

nanomaterials // Theor. Found. Chem. Eng. 2011, Vol. 45, No. 1, pp. 3–14.
[Саркисов П.Д., Бутусов О.Б., Мешалкин В.П. Математические методы анализа фрактальных структур на микрофотографиях нанокomпозитов // Теорет. основы хим. технологии. 2010. Т. 44, № 3 С. 17-19.]

392. Ефимов И.В., Петров Д.Ю., Каплина Т.В. Экспертная система для идентификации точечных дефектов листового стекла / Материалы Всероссийская научная конференция с международным участием «Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении». - Саратов: ООО Изд. центр «Наука». 2013. С. 50-52.

393. Петров Д.Ю., Котерева Ю.С. Применение экспертных систем для повышения качества листового стекла // Проблемы и перспективы точной механики и управления в машиностроении: Мат. Межд. науч. конф. - Саратов, 2007. С. 262-266.

394. Мешалкин, В. П. Комплексная вейвлет-нейронно-эвристическая процедура диагностики точечных дефектов листового стекла / В. П. Мешалкин, Д. Ю. Петров // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48. № 3. С. 323. DOI 10.7868/S0040357114030129.

395. Производство строительного и технического стекла / В.М. Будов, П.Д. Саркисов. - М.: Высшая школа. 1991. 319 с.

396. Новик, А. Ю. Модели и методы прогнозирования показателей качества листового стекла / А. Ю. Новик, В. А. Иващенко // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 37-40.

397. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. - М.: Химия. 1995. 367 с.

398. Комбинированная модель дифференциально-диагностического процесса / А.Н. Антамошин, А.А. Большаков// Вопросы современной науки и практики университет им. В.И. Вернадского. №1(11). 2008. Том 2. С. 61-69.

399. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: “Техносфера”. 2006. 1103 с.

400. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в MATLAB. - М.: "Техносфера". 2006. 616 с.

401. Саркисов П. Д. Компьютерные инструментальные средства молекулярной инженерии и вейвлетно-морфометрический анализ текстуры наноматериалов / П. Д. Саркисов, О. Б. Бутусов, В. П. Мешалкин // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, № 1. С. 3-14.

402. Аппаратурно-техническое и алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы локализации точечных дефектов в листовом стекле / И.В. Ефимов, Д.Ю. Петров, В.А. Иващенко, В.П. Мешалкин // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 2. С. 122-128.

403. Давыденко Е.А. Эволюция концепции сбалансированной системы показателей: от истоков к цифровому предприятию // Российское предпринимательство. 2018. №2. С. 457-472.

404. Сайт компании «Современные технологии управления» [Электронный ресурс]: Стратегическая карта управления. – URL: https://www.businessstudio.ru/upload/files/strategicheskaya_karta.doc (дата обращения 21.04.2022).

405. Система сбалансированных показателей: роль в управлении предприятием, пути совершенствования / Б. И. Табачникас // Проблемы современной экономики, 2006. № 3/4 (19/20). С. 139-142.

406. Сайт компании «Современные технологии управления» [Электронный ресурс]: Система сбалансированных показателей. – URL: <https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/bsc/theory> (дата обращения 21.04.2022).

407. Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas, Wolfgang Wahlster Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution VDI nachrichten, Berlin, 1. 4. 2011, [Электронный ресурс]: - URL: <https://web.archive.org/web/20130304101009/http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Industrie-4-0-Mit-dem-Internet-der-Dinge-auf-dem-Weg-zur-4-industriellen-Revolution/52570/1> <http://www.wolfgang->

wahlster.de/wordpress/wp-content/uploads/Industrie_4_0_Mit_dem_Internet_der_Dinge_auf_dem_Weg_zur_vierten_industriellen_Revolution_2.pdf (дата обращения 22.01.2021)

408. Plug the Holes in the Swiss Cheese Model /TODD STAUFFER, P.E., NICHOLAS P. SANDS, P.E., DAVID STROBHAR, P.E. // AIChE 2017 Spring Meeting and 13th Global Congress on Process Safety, San Antonio, TX, Mar. 26–29, 2017. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/320094794_Plug_the_holes_in_the_Swiss_cheese_model (дата обращения 21.01.2021)

409. ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018 Функциональная безопасность. Системы безопасности приборные, связанные с технологическими процессами. Часть 1. Общие требования. - М.: Стандартинформ. 2018. 40с.

410. РД 09-536-03 Методические указания «О порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на химико-технологических объектах». – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). 2003. 36с.

411. Постановление Правительства РФ от 15.09.2020 N 1437 «Об утверждении Положения о разработке планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах». – М.: Правительство Российской Федерации.

412. Оценка надежности системы из элементов с тремя состояниями с использованием ПК АРБИТР / А.С.Можаев, А.А.Нозик, А.В.Струков// Тр. СПИИРАН. 2013. №31. С.123–146

413. Köck, Bianca & Friedl, Anton & Serna Loaiza, Sebastián & Wukovits, W. & Mihalyi, Bettina. (2023). Automation of Life Cycle Assessment—A Critical Review of Developments in the Field of Life Cycle Inventory Analysis. Sustainability. N15. pp.5531. DOI 10.3390/su15065531.

414. ГОСТ Р 56135-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. - М.: Стандартинформ. 2014. 12с.

415. ГОСТ Р 57318-2016 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Применение и управление процессами системной инженерии». - М.: Стандартиформ. 2016. 28 с.

416. Афанасьевский Л.Б. Методика аналитического и имитационного моделирования дискретных однородных марковских цепей с использованием MathCAD / Л.Б.Афанасьевский, А.Н. Горин, В.В Онуфриенко, А.Г Фадин. // Современные информационные технологии и ИТ-образование. №9. 2013. С. 456-462.

417. Petrov D.Yu. Assessment of the protection level of continuous production based on the markov life cycle model // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. 2022. V. 22. N3. pp. 393-400.

418. Оценка рисков промышленных предприятий на основе имитационного моделирования // Е. Бочаров, О. Алексенцева, Д. Ермошин // Прикладная информатика. 2008. №1. С.34-36.

419. Можаяев А.С. Технология автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 9. С. 1-14.

420. Можаяева, И. А. Особенности оценки показателей функциональной безопасности систем противоаварийной автоматической защиты с использованием деревьев неисправностей / И. А. Можаяева, А. В. Струков // Надежность. 2022. Т. 22. № 4. С. 45-52. DOI 10.21683/1729-2646-2022-22-4-45-52. EDN EFUNJB.

421. Струков А. В. Приближенные и упрощенные методы расчета показателей функциональной безопасности систем противоаварийной автоматической защиты / А. В. Струков, И. А. Можаяева // Актуальные проблемы защиты и безопасности : Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 01–04 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2024. С. 550-557.

422. Петров, Д. Ю. Анализ показателей надежности производства листового стекла / Д. Ю. Петров // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2014. № 8(67). С. 260-263.

423. Онтология процесса управления ремонтами в электросетевой компании / О. М. Проталинский, А. А. Ханова, И. А. Щербатов [и др.] // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 110-119. DOI 10.24160/1993-6982-2018-6-110-119.

424. 4. Анализ рынка листового стекла в России - 2024. Показатели и прогнозы [Электронный ресурс]. - URL: <https://marketing.rbc.ru/research/39824/> (дата обращения: 16.06.2025).

425. 7. Казаринов Л. С., Барбасова Т. А. Интегрированное управление энергоемкостью металлургического производства // Вестник Южно-Уральского государственного университета Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2015. № 15. С. 121-124. DOI 10.14529/ctcr150214

426. 8. Raoufi, Kamyar & Sutherland, John & Zhao, Fu & Clarens, Andres & Rickli, Jeremy & Fan, Zhaoyan & Huang, Haihong & Wang, Yue & Lee, Wo Jae & Mathur, Nehika & Triebe, Matthew & Desabathina, Sai & Haapala, Karl. Current state and emerging trends in advanced manufacturing: smart systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. 134. 3031-3050. 10.1007/s00170-024-14279-z.

427. Redelinghuys, A.J.H.; Basson, A.H.; Kruger, K. A six-layer architecture for the digital twin: A manufacturing case study implementation. J. Intell. Manuf. 2020. 31. Pp. 1383–1402 [Электронный ресурс]. - URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10845-019-01516-6> (дата обращения 12.06.2025)

428. Robinson S. Simulation: The practice of model development and use. Wiley. 2004. 336 p.

429. В Минаев. А., М Сычев. П., Куликов Л. С., Вайц Е. В. Моделирование манипулятивных воздействий в социальных сетях / //

Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 1(24). С. 494-510. DOI 10.26102/2310-6018/2019.24.1.003

430. Копп В. Я., Заморенов М. В., Чаленков Н. И. Имитационное моделирование процесса функционирования технической ячейки с необесценивающими отказами // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 1. С. 57-64. DOI 10.22213/2410-9304-2020-1-57-64

431. Ершова И. В., Тотмянин А. А. Моделирование производственных заданий с использованием программы Anylogic // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. № 1(19). С. 32-39. DOI 10.30987/2658-6436-2023-1-32-39

432. Акопов А.С. Имитационное моделирование. - М.: Юрайт, 2024. 426 с. ISBN 978-5-534-18379-5

433. Tang J., Leu G., Abbass H.A. Discrete event simulation / Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving. IEEE, 2020. pp. 121–142.

434. Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Системная динамика. - М.: ЦЭМИ РАН, 2014. 70 с.

435. Akopov A.S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // International Journal of Computer Applications in Technology. 2012. V 45. N4. pp. 220–230. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122.

436. Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control. Cybernetics and Information Technologies. 2019. V 19. N2. pp. 87–103. DOI: 10.2478/cait-2019-0017.

437. Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Агентное моделирование. - М.: ЦЭМИ РАН. 2016. 70 с.

438. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Эпштейн Д. М. Агент-ориентированное моделирование для сложного мира; Центральный экономико-математический институт РАН. - М: ООО "МАКС Пресс". 2022. 88 с.

439. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelyan A.K. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia. *Environmental Modelling and Software*. 2019. N 116. pp. 7–25. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.003.

440. Borshchev A. The Big Book of simulation modeling. Multimethod modeling with AnyLogic 8. AnyLogic North America. [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/> (дата обращения: 16.06.2025)

441. Волошко А. Г., Ивутин А. Н., Крюков О. С. Методы моделирования и анализа производственных процессов для разработки стратегии модернизации предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 12. С. 36-44.

442. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L. Developing digital twins for production enterprises // *Business Informatics*. 2019. V. 14. N 1. pp. 7–16. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16

443. Zhang, He & Li, Yilin & Zhang, Shuai & Song, Lukai & Tao, Fei. (2025). Artificial Intelligence-Enhanced Digital Twin Systems Engineering Towards the Industrial Metaverse in the Era of Industry 5.0. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 38. DOI 10.1186/s10033-025-01210-0 [Электронный ресурс]. - URL: https://www.researchgate.net/publication/390260558_Artificial_Intelligence-Enhanced_Digital_Twin_Systems_Engineering_Towards_the_Industrial_Metaverse_in_the_Era_of_Industry_50 (дата обращения: 16.06.2025)

444. Документация AnyLogic. Эксперимент Монте-Карло [Электронный ресурс]. - URL: <https://anylogic.help/anylogic/experiments/monte-carlo-experiment.html> (дата обращения: 16.06.2025)

445. Петров Д.Ю. Стратегическая карта целей производства листового стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 10. С. 133-139. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_10_133

446. Петров Д.Ю. Модель системной динамики производства листового стекла // Сборник трудов V Международной научно-практической конференции «Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании» (15 декабря 2022 года). М.: НИЯУ МИФИ; Балаково: БИТИ НИЯУ МИФИ. 2023. Т. I. С. 88-92.

447. Petrov D.Yu. A System Dynamics Model for Float Glass Production Management. Springer, Cham. Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control, 2023. V. 437. Pp. 227-240. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35875-3_18.

448. Петров, Д. Ю. Структура комплексной модели изменения режимов функционирования производства листового стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 8. С. 82-85. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_8_82

449. Сайт компании AnyLogic [Электронный ресурс]: Дискретно-событийное имитационное моделирование. – URL : <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/discrete-event-simulation/> (дата обращения 15.05.2023).

450. Петров Д.Ю. Оптимизация функционирования участка съёма листового стекла / Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности - МНПК «ЛЭРЭП-6-2012»: сб. науч. тр. VI Междунар. научн.-практ. конф.: Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. 2012. С. 205-207.

451. Optimization of structures of robotized complexes of arc welding / Rezchikov, A.F., Ivashchenko, V.A., Petrov, D.Yu.// Han Jie/Welding & Joining, 1998, N11. pp. 60–65.

452. Modeling the Operation of a Digital Twin of a Conveyor Line / Yakovlev, D., Petrov, D., Kosterev, A./ Studies in Systems, Decision and Control, 2024, N554, pp. 105–115.

453. Петров Д.Ю. Алгоритм оптимизации структур робототехнических сборочных комплексов / А. Ф. Резчиков, А. А. Большаков, Д.Ю. Петров, Д. Д. Яковлев // Автоматизация в промышленности. 2025. № 5. С. 3-10.

454. Программный комплекс управления жизненным циклом мехатронных систем / А.А. Большаков, Д.Ю. Петров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 20-26.

455. Петров Д.Ю. Моделирование функционирования участка съёма листового стекла / Д.Ю. Петров, С.А. Черкасов // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности – МНПК «ЛЭРЭП-7-2013»: сб. науч. тр. VII Междунар. научн.-практ. конф.: Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2013. С. 87-89.

456. Петров Д. Ю. Имитационное моделирование участка съёма листового стекла / Д. Ю. Петров, С. А. Черкасов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2014. № 8(67). С. 174-176.

457. ГОСТ 34.601-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания». – М.:Государственный комитет СССР по стандартам. 1990. 6 с.

458. Стандарт ISO 29148 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering. International Organization for Standardization. 2018. 64p.

459. Селяков, Е. Б. Методологические аспекты управления требованиями в проектируемых системах / Е. Б. Селяков, С. М. Селякова // Вестник Донецкого института автомобильного транспорта. 2008. № 3. С. 4-8.

460. Общая химическая технология. Методология проектирования химико-технологических процессов [Электронный ресурс]: - URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/37357/#20>. (дата обращения 21.01.2021).

461. Холоднов В.А. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов. Практическое руководство / В.А.Холоднов, В.П.Дьяконов и др. СПб.:АНО НПО «Профессионал». 2003. 480 с.

462.. Vasquez Capacho J.W. Alarm management via temporal pattern learning / J.W. Vasquez Capacho, A.Subiasa, L.Travé-Massuyès, F.Jimenez // Engineering Applications of Artificial Intelligence. (2017). N65. pp.506–516 [Электронный ресурс]: - URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.engappai.2017.07.008>. (дата обращения 22.01.2021).

463. IEC 61131-3:2013 Programmable controllers - Part 3: Programming languages. - International Organization for Standardization. 2013. 254 p. [Электронный ресурс]: - URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4552>. (дата обращения 22.01.2021).

464. Makarov, R.I., Khorosheva, E.R. Information Analysis of the Sheet-Glass Utilization Factor in Production. Glass Ceram. (2020). N77. pp.295–297. DOI 10.1007/s10717-020-00292-7

465. Петров Д.Ю. Архитектура информационной системы управления жизненным циклом цифрового двойника для непрерывного производства // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. №57. С. 98-104

466. Дерябин С.А. Язык моделирования архитектуры цифрового предприятия: методологический подход к проектированию систем индустрии 4.0 / С.А. Дерябин, Е.И. Кондратьев, У.А.О. Рзазаде, И.О.Темкин // ГИАБ. 2022. №2. С.97-110.

467. Осинцев А.В. Объектно-ориентированный анализ алгоритма управления и проектирование архитектуры программного обеспечения для климатической экранированной ТЕМ-камеры / А.В. Осинцев, М.Е.Комнатнов // Доклады ТУСУР. 2019. №2. 83-89.

468. Morozov, Andrey & Mutzke, Thomas & Ding, Kai. (2021). Automated Transformation of UML/SysML Behavioral Diagrams for Stochastic Error Propagation Analysis of Autonomous Systems. ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg. DOI 10.1115/1.4051781. [Электронный ресурс]: - URL:

https://www.researchgate.net/publication/353254377_Automated_Transformation_of_UMLSysML_Behavioral_Diagrams_for_Stochastic_Error_Propagation_Analysis_of_Autonomous_Systems (дата обращения 22.01.2025).

469. Weilkiens, Tim & Lamm, Jesko & Roth, Stephan & Walker, Markus. (2022). Model-Based System Architecture, Second Edition. DOI 10.1002/9781119746683. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/353254377_Automated_Transformation_of_UMLSysML_Behavioral_Diagrams_for_Stochastic_Error_Propagation_Analysis_of_Autonomous_Systems (дата обращения 22.01.2025).

470. Altay, Haluk & Solmazgöl, M. (2021). Model-Based Systems Engineering Approach with SysML for an Automatic Flight Control System. 1-19. DOI 10.5121/csit.2021.111101. [Электронный ресурс]: - URL: https://www.researchgate.net/publication/353254377_Automated_Transformation_of_UMLSysML_Behavioral_Diagrams_for_Stochastic_Error_Propagation_Analysis_of_Autonomous_Systems (дата обращения 22.01.2025).

471. Киреев А.П., Шаров С.А. Способ проектирования интегрированной бортовой аппаратуры космического аппарата с использованием архитектурного языка AADL // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 7. С. 34-40. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39691> (дата обращения: 18.08.2023).

472. Автоматизированная нейронно-эвристическая процедура распознавания точечных дефектов в листовом стекле / И. В. Ефимов, Д. Ю. Петров, В. А. Иващенко, В. П. Мешалкин // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 8. С. 500-504.

473. Комплекс программ идентификации точечных дефектов листового стекла / В. П. Мешалкин, Д. Ю. Петров, В. А. Иващенко, И. В. Ефимов // Программные продукты и системы. 2014. № 3. С. 147-152.

474. Петров Д.Ю. Инжиниринг цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла / В.П. Мешалкин., Т.Б. Чистякова,

Д.Ю. Петров // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 2. С. 561–566.

475. Автоматизация производства листового стекла. Учебное пособие / Р.И.Макаров, Е.Р.Хорошева, С.А.Лукашин. М.:Изд-во АСТ, 2004. 192 с.

476. Положение о планово-предупредительном ремонте и эксплуатации оборудования предприятий промышленности строительных материалов. Вып. 4. - М.:ПКБ ГИС. 1969. 346 с.

477. Приказ Министерства энергетики РФ от 25 октября 2017 г. N 1013 "Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок "Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики". -М.: Министерство энергетики Российской Федерации. 2017.

478. Программно-информационный комплекс для решения задач планово-предупредительного ремонта энергетического оборудования стекольных производств (статья) /Д.Ю.Петров // Проблемы точной механики и управления: Сб. науч. тр. – Саратов. 2004. С. 107-110.

479. Применение имитационного моделирования для исследования функционирования дозировочно-смесительной линии стекольной шихты / О.А. Крайнов, В.А. Иващенко, Д.Ю. Петров // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности – МНПК «ЛЭРЭП-7-2013»: сб. науч. тр. VII Междунар. научн.-практ. конф. Ярославль. 27-29 ноября 2013г. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2013. С. 69-70.

480. Имитационное моделирование дозировочно-смесительной линии стекольной шихты /Д.Ю.Петров, О.А. Крайнов // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности – МНПК «ЛЭРЭП-6-2012»: сб. науч. тр. VI Междунар. научн.-практ. конф.: - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. С. 200-202

481. Петров Д.Ю., Котерева Ю.С., Новик А.Ю. Автоматизированная система повышения квалификации персонала производства листового стекла

// Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: сб. тр. XX1 междунаро. научн. конф.: в 10 т. Т 8. Секция 8 / под общ. ред. В.С. Балакирева. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2008. С.209-211.

482. Большаков А.А., Шатохин В.В. Синтез автоматизированных комбинированных обучающих систем // Системы управления и инф. технологии. 2004. № 4(16). С. 73-77.

483. Петров, Д. Ю. Структура цифрового двойника предприятия непрерывного производства / Д. Ю. Петров // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 9. С. 102-105. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_9_102. EDN EOLIJY.

484. Программа для моделирования растекания расплава стекла при его формировании методом флоат-процесса / Ю.А. Захаров, Д.Ю. Петров, В.Ю. Мусатов// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023619943, 17.05.2023. Заявка № 2023618403 от 28.04.2023.

485. Программа для обучения персонала выполнению штатных операций в различных режимах при варке стекла и его формовании и действиям по устранению нештатных ситуаций и дефектов стекла / В.П. Мешалкин, А.Ф. Резчиков, Д.Ю. Петров, В.Ю. Мусатов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023619944, 17.05.2023. Заявка № 2023618401 от 28.04.2023.

486. Программная модель системной динамики функционирования многостадийного производства листового стекла методом флоат-процесса / А.А. Большаков, Д.Ю. Петров, В.Ю.Мусатов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023664748, 07.07.2023. Заявка № 2023663928 от 03.07.2023.

487. Система управления подготовкой котловой воды / Свидетельство на полезную модель № 29158. Заявка № 2003102173. Дата поступления 30.01.2003. Федонин В.Н., Бекасов Д. М., Подопригора С. П., Петров Д.Ю.

488. Петров Д.Ю. Системы искусственного интеллекта в мехатронике / А. А. Большаков, М. Б. Бровкова, В. П. Глазков [и др.]. – Саратов: Саратовский

государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2014. 252 с. (личное участие раздел 1.4)

489. Петров, Д. Ю. Анализ проблем цифровизации непрерывных производств / Д. Ю. Петров // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов XXVII научной конференции, Евпатория, 02–09 июля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Буки Веди", 2023. – С. 63-65.

490. Петров Д.Ю. Модельно-управляемое проектирование автоматизированной системы идентификации дефектов листового стекла // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 4. С. 41–48.

491. Петров Д.Ю. Оптимизация планирования выпуска партий многоассортиментного высококачественного листового стекла / В. П. Мешалкин, А. А. Большаков, Д. Ю. Петров // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2025. № 74. С. 66-72.

492. Причинно-следственный подход для системного анализа производства листового стекла / В.С. Домнич, Ю.А. Аветисян, Д.Ю. Петров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 4 (50). С. 75-79.

493. Построение автоматизированной системы управления производством шихты / О.А. Крайнов, Д.Ю. Петров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. №4 (43). Вып. 2. С. 105-108.

494. Петров Д.Ю. Математическое моделирование процесса формирования листового стекла как объекта автоматизированного управления // Химическая промышленность сегодня. 2024. № 2. С. 55-64.

495. Wavelet-neuro-heuristics complex procedure of diagnostics of point defects of sheet glass / Meshalkin V.P., Petrov D.Yu. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2014. Т. 48. № 3. pp. 301-305.

496. Algorithms and a set of programs for glass charge quality management using artificial neural networks / V.P. Meshalkin, A.A. Bolshakov, D.Yu. Petrov, O.A. Krainov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2012. Т. 46. № 3. pp. 329.

497. Применение гибридной цифровой платформы для обработки больших массивов данных химических производств / Н. А. Куцевич, Д. Х. Михайлиди, Д. Ю. Петров, А. Г. Бубнов // Российский химический журнал. Russian Journal of General Chemistry 2023. Т. 67. № 3. С. 77-83. DOI 10.6060/rcj.2023673.11.

498. Энергоресурсоэффективные автоматизированные многостадийные производства высококачественного листового стекла с применением цифровых двойников / В.П. Мешалкин, Д.Ю. Петров //Международный год стекла в России. Материалы научной конференции — СПб.: АИР. 2022. С. 68–82. [Электронный ресурс]: - URL: https://pureportal.spbu.ru/files/99155939/_pdf?ysclid=mm29tzhsw633459947 (дата обращения 22.01.2025).

499. Стратегия повышения техногенной безопасности на предприятиях с непрерывным производством/ Н.В. Лалыкин, А.Ф. Резчиков, Д.Ю. Петров // Высокие технологии - путь к прогрессу: Сб. науч. тр. - Саратов: «Научная книга». 2003. С. 133-135.

500. Разработка систем диспетчерского управления и сбора первичной информации для производства стекла / Р.С. Быков, В.П. Мешалкин, Д.Ю. Петров // В сборнике: Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности. V Международная конференция Российского химического общества им. Д.И. Менделеева: тезисы докладов. 2013. С. 62-63.

501. Петров Д.Ю. Системный анализ функционирования непрерывного производства // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 6. С. 113-118.

502. Петров Д.Ю. Разработка модели состояний жизненного цикла непрерывного производства // В сборнике: Компьютерные науки и информационные технологии. Материалы Международной научной конференции. Саратов. 2021. С. 108-110.

503. Петров Д.Ю. Оценка повторяемости позиционирования робота для съёма листов стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2025. № 10. С. 67-71.

**Приложение 1. Копии свидетельств о государственной регистрации
программ для ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023619944

**Программа для обучения персонала выполнению
штатных операций в различных режимах при варке
стекла и его формовании и действиям по устранению
нештатных ситуаций и дефектов стекла**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Саратовский
государственный технический университет имени Гагарина
Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) (RU)*

Авторы: *Мешалкин Валерий Павлович (RU), Резчиков Александр
Федорович (RU), Петров Дмитрий Юрьевич (RU), Мусатов
Вячеслав Юрьевич (RU)*

Заявка № **2023618401**
Дата поступления **28 апреля 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **17 мая 2023 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*
 **Ю.С. Зубов**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023664748

**Программная модель системной динамики
функционирования многостадийного производства
листового стекла методом флот-процесса**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) (RU)*

Авторы: *Большаков Александр Афанасьевич (RU), Петров
Дмитрий Юрьевич (RU), Мусатов Вячеслав Юрьевич (RU)*

Заявка № 2023663928

Дата поступления 03 июля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 июля 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

K.S. Zubov

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023619943

**Программа для моделирования растекания расплава
стекла при его формировании методом флоат-процесса**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) (RU)*

Авторы: *Захаров Юрий Анатольевич (RU), Петров Дмитрий
Юрьевич (RU), Мусатов Вячеслав Юрьевич (RU)*

Заявка № 2023618403

Дата поступления 28 апреля 2023 г.

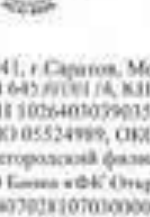
Дата государственной регистрации

в Регистре программ для ЭВМ 17 мая 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

К.С. Зубов



0958

410041, г. Саратов, Московские шоссе, 2
 ЮНП 64549101/А, КПП 645301001
 ОГРН 1026403079035
 ОКПО 05524989, ОКВЭД 95120
 Нижегородский филиал
 ПАО «Саратовский институт стекла»
 Р/с: 407028107030000000214
 БИК 042202881, ИНН 7706092528
 КПП 526002001
 К/с: 30101810100000000000
 Тел.: 57-00-23

№ 03 2024 г. 55

на _____

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

САРАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТЕКЛА

Генеральный директор

Отдел продаж листового стекла

Отдел продаж продукции промышленной обработки

тел./факс: (845-2) 63-28-25
факс: 63-12-32

тел./факс: 63-28-10, 45-93-28

тел./факс: 63-13-20
тел.: 43-94-84

«УТВЕРЖДАЮ»

Исполняющий обязанности
Генерального директора
АО «Саратовский институт стекла»

О.Б. Понашев

« 12 » 03 2024 г.

МП

СПРАВКА

о практическом использовании результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, выполненной доцентом, к.т.н. Петровым Дмитрием Юрьевичем

Предложенное в диссертационной работе методическое и алгоритмическое обеспечение автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью непрерывного многостадийного производства высококачественного листового стекла с применением цифровых двойников и фрактально-нейросетевых алгоритмов практически использовалась в период с 2002 – 2023 гг. в АО «Саратовский институт стекла» при выполнении исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также для практического повышения качества, производимого листового стекла, и услуг технологического инжиниринга, предоставляемых различным предприятиям.

Несмотря на то, что в производстве высококачественного листового стекла предприятие использует компьютерные средства и автоматизированные системы управления, на производстве остаются нерешенными ряд важных организационно-технических задач: оптимизация качества стекольной шихты, диагностика дефектов листового стекла,

Ж.Д. реквизиты: Промышленная ж.д., название – ст. Трофимовский, 2, код 620207, контейнерная – ст. Саратов - 2, код 620508

прогнозирование функционирования производства высококачественного листового стекла на основе комплексной имитационной модели, прогнозирование функционирования технологических процессов на основе компьютерных моделей.

Применение, предложенных автором оригинального методического и алгоритмического обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью непрерывного многостадийного производства высококачественного листового стекла позволило выявить потенциал совершенствования режимов функционирования дозирочно-смесительной линии, а также систематизировать инженерно-технологические знания о взаимозависимых химико-технологических процессах дозирования и смешивания стекольной шихты, что повысило эффективность деятельности предприятия.

Применение результатов диссертационного исследования на предприятии, позволили выявить узкие места в организации процесса бизнес-процессов НИОКР, а также связанных с ними этапов конструкторской и технологической подготовки производства.

Таким образом, результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, выполненной доцентом, к.т.н. Петровым Д.Ю., имеют несомненное важное практическое значение, практически использованы на АО «Саратовский институт стекла» и обеспечили повышение энергоресурсоэффективности многостадийного производства высококачественного листового стекла.

Начальник технологического отдела
АО «Саратовский институт стекла»


Сергей Владимирович Сухарев

2.2. АО «Салаватстекло»



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
 Акционерное общество «Салаватстекло Волга»
 410041, г. Саратов, ул. им. М.В. Ломоносова, 1
 Тел.: (8452) 305 929, 305 510, 305 517
 Факс: (8452) 305 916
 head@sal-steklo.ru

ИНН 6453054397, КПП 645301001, ОКПО 51404745, ОГРН 1026403044073, р/с: 40702830156020114113, ПОВОЛЖСКИЙ БАНК ПАО СБЕРБАНК
 г. Самара, БИК 043601607, к/с № 30101810200000000607

От 19.11.2008 № 25-16-342

На № _____ от _____

Справка

об использовании результатов диссертационной работы «Методическое и программно-информационное обеспечение автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла
 Петрова Дмитрия Юрьевича

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук Петрова Д.Ю., в виде научно-технического отчета «Разработка технического задания на интегрированную автоматизированную систему управления» и программ для ЭВМ: «Компьютерный тренажер», «Тренажер», «ППР энергетического оборудования» и «Единая информационная система предприятия» приняты к использованию в отделах главного технолога, главного энергетика, КИПиА и учебном центре ОАО «Саратовстекло»:

1) акт приемки выполненных работ за октябрь 2008 года №04/2008 от 02.10.2008 г. по договору на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло»» договор № 2217 ВОР/КБ от 23.08.2007г.

2) акт приемки выполненных работ за сентябрь 2006 г. — апрель 2007 г. от 30.04.2007 г. по договору на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка программного обеспечения для обучения персонала выполнению штатных операций в различных режимах при варке стекла и его формовании флоат способом и действиям по устранению нештатных ситуаций и дефектов стекла» договор № 10 от 01.03.2006 г.

3) акт приемки выполненных работ за сентябрь 2002г. — апрель 2003 г. от 29.03.2003 г. по договору на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка базы данных и программного обеспечения для задач управления — планово-предупредительным ремонтом энергетического оборудования ОАО «Саратовстройстекло»» договор № 1496ПД от 20 сентября 2002 года

4) акт приемки выполненных работ от 10.10.2002 г. по договору на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка компьютерного тренажера для обучения операторов в аварийных ситуациях» договор №5 от 07 июля 2001 г.

5) акт приемки выполненных работ от 25.05.1999 г. по договору на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка технического задания на

интегрированную автоматизированную систему управления ОАО «Саратовстекло»
договор №22 от 5 апреля 1999 г.

Директор технический
АО «Салаватстекло Волга»



А.А. Елисеев

2.3. АО Конструкторское бюро промышленной автоматики



Справка

об использовании результатов диссертационной работы
Петрова Дмитрия Юрьевича

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук Петрова Д.Ю., в виде научно-технических отчетов и программ для ЭВМ приняты к использованию АО «КБПА»:

1) договор № 02/2015 от 21.07.2015 г. на выполнение научно-исследовательской работы «Создание программно-математического обеспечения экспериментальной системы автоматического управления».

2) договор № 420-540-2020 от 30.11.2020 г. на выполнение научно-исследовательской работы «Анализ отечественных процессоров и алгоритмов модели OSI и TCP/IP для разработки коммутатора».

3) договор № 730-540-2021 от 10.12.2021 на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка концепции создания высокотехнологичного производства с применением технологий Industry 4.0 (разработка автоматизированной системы)».

4) договор № 144-540-2024 от 01.04.2024 на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка математических моделей на основе конечных автоматов и алгоритмов программно-информационной системы для проектирования и тестирования системы автоматического управления».

5) договор № 323-540-2024 от 02.07.2024 на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка организационной системы управления обслуживанием оборудования на основе системного анализа бизнес-процессов и использования отечественного программного обеспечения Business Studio».

Полученные результаты могут применяться для сокращения сроков этапов конструкторской, технологической подготовки производства и уменьшения эксплуатационных затрат на производстве за счет предложенных средств моделирования и программного обеспечения.

Главный конструктор

Начальник отдела перспективного планирования
и научно-проектной деятельности

20.03.2024



В.Н. Слюнов

2.4. СГУ им Н.Г. Чернышевского.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
СГУ имени Н.Г.Чернышевского,


 «19» И.И. Малицкий 2023 г.
 МП 

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук
Петрова Дмитрия Юрьевича

При обучении студентов по направлениям подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» и 27.03.03 «Системный анализ» в дисциплинах «Автоматизированные системы управления» и «Основы проектирования систем» используются разработанные в диссертации методология, математические и компьютерные модели, алгоритмы и архитектура комплекса программ:

- методология инжиниринга цифровых двойников автоматизированных многостадийных непрерывных производств;
- комплексные модели цифровых двойников организационных уровней управления автоматизированного производства высококачественного листового стекла;
- компьютерные модели технологических процессов многостадийного производства высококачественного листового стекла;
- математические модели и алгоритмы для автоматизации контроля качества листового стекла;
- архитектура комплекса проблемно-ориентированных программ для математического моделирования многостадийного производства листового стекла.

Следует отметить, что в диссертации содержатся полезные для студентов математические и имитационные модели цифровых двойников организационных уровней управления непрерывного автоматизированного производства.

Декан факультета компьютерных наук
и информационных технологий
к.ф.-м.н., доцент



Миронов Сергей Владимирович

Заведующий кафедрой «Системный анализ
и автоматическое управление»,
к.ф.-м.н., доцент



Тананко Игорь Евстафьевич

2.5. НИУ МЭИ

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»
д.т.н., проф.



В.К. Драгунов

« 8 » июня
МП

2023 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук
Петрова Дмитрия Юрьевича

При обучении студентов по направлениям подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» в дисциплинах «Теплоагрегатное оборудование предприятий» и «Цифровые двойники объектов теплоэнергетики» используются разработанные в диссертации методология, математические и компьютерные модели, алгоритмы и архитектура комплекса программ:

- методология инжиниринга цифровых двойников автоматизированных многостадийных непрерывных производств;
- имитационные модели системной динамики организационных уровней управления автоматизированного непрерывного производства;
- компьютерные модели технологических процессов многостадийного производства высококачественного листового стекла;
- архитектура цифрового тренажера для обучения операторов технологических процессов.

Следует отметить, что в диссертации содержатся полезные для студентов дискретно-событийные модели и агентные модели, обеспечивающие прогнозирование функционирования непрерывного автоматизированного производства.

Директор Института энергоэффективности
и водородных технологий
кандидат технических наук, доцент



Щербатов Иван Анатольевич

Заведующий кафедрой «Инновационные
технологии наукоемких отраслей»
доктор технических наук, доцент



Рогалев Андрей Николаевич

2.6. СГУ. Учебный курс повышения квалификации «Разработка бизнес-процессов промышленного предприятия»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе СГУ

И.Г. Малицкий
« 20 » *сентября* 2025 г.
М.П.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
«Методическое и программно-информационное обеспечение автоматизированного
управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства
высококачественного листового стекла»
на соискание ученой степени доктора технических наук
Петрова Дмитрия Юрьевича

Основные результаты диссертации использованы в учебно-методической работе при разработке авторского учебного курса «Разработка бизнес-процессов промышленного предприятия» повышения квалификации работников промышленных предприятий Саратовской области.

Программа направлена на совершенствование профессиональных компетенций, необходимых для выполнения организационно-управленческой, информационно-аналитической и предпринимательской деятельности.

В рамках программы слушатели получили теоретические знания и практические навыки: проектирования системы управления компании на основе цифровой платформы Business Studio, проектирования бизнес-процессов, разработки бизнес-процессов в нотации IDEF0, разработки бизнес-процессов в нотации BPMN 2.0, формирования регламентирующей документациисистемы управления компании на основе цифровой платформы Business Studio.

В диссертации содержатся полезные для слушателей математические и имитационные модели цифровых двойников организационных уровней управления промышленного предприятия.

Директор Института дополнительного
профессионального образования



Ю.Г. Голуб

2.7. СГУ. Учебный курс повышения квалификации «Чертежник - конструктор робототехнических систем»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе СГУ



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
«Методическое и программно-информационное обеспечение автоматизированного
управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства
высококачественного листового стекла»
на соискание ученой степени доктора технических наук
Петрова Дмитрия Юрьевича

Основные результаты диссертации использованы в учебно-методической работе при разработке авторского учебного курса «Чертежник-конструктор робототехнических систем» повышения квалификации работников промышленных предприятий Саратовской области.

Программа направлена на формирование профессиональных компетенций на основе профессионального стандарта 40.059 «Промышленный дизайнер», в том числе для работы с конкретным программным обеспечением, технологиями и иными профессиональными средствами, при выполнении чертежно-конструкторских работ при разработке робототехнических систем.

В рамках программы слушатели получили теоретические знания и практические навыки необходимые для формирования у слушателей профессиональных компетенций, обеспечивающих формообразование промышленно изготавливаемой продукции с учетом производственных и маркетинговых технологий, конструирования, структурных и функциональных характеристик, эргономических требований и требований к робототехническим системам.

В диссертации содержатся полезные для слушателей математическая и компьютерная модели позиционирования робота-манипулятора для упаковки листов стекла; имитационная модель организационно-технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла.

Директор Института дополнительного
профессионального образования

Ю.Г. Голуб

2.8. СГУ. Учебный курс повышения квалификации «Специалист по проектированию автоматизированных систем управления технологическими процессами»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе СГУ

И.Т. Матвицкий
«10» НОЯБРЯ 2025 г.
МЗ

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
«Методическое и программно-информационное обеспечение автоматизированного
управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства
высококачественного листового стекла»
на соискание ученой степени доктора технических наук
Петрова Дмитрия Юрьевича

Основные результаты диссертации использованы в учебно-методической работе при разработке авторского учебного курса «Специалист по проектированию автоматизированных систем управления технологическими процессами» повышения квалификации работников промышленных предприятий Саратовской области.

Программа направлена на формирование профессиональных компетенций на основе профессионального стандарта 40.178 «Специалист по проектированию автоматизированных систем управления технологическими процессами» в частности трудовых функций «Разработка и оформление рабочей документации автоматизированной системы управления технологическими процессами», «Разработка проекта автоматизированной системы управления технологическими процессами».

В рамках программы слушатели получили теоретические знания и практические навыки необходимые для формирования у слушателей профессиональных компетенций, обеспечивающих самостоятельное выполнение полного цикла проектных работ по созданию автоматизированных систем управления технологическими процессами, с акцентом на разработку, оформление и выпуск проектной, рабочей и программной документации в соответствии с действующими нормативными требованиями.

Следует отметить, что в диссертации содержатся полезные для слушателей математические и имитационные модели цифровых двойников технологических процессов; архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ компьютеризированного проектирования АСУТП.

Директор Института дополнительного
профессионального образования



Ю.Г. Голуб

2.4. Академия наук Республик Татарстан

УТВЕРЖДАЮ

Президент Академии наук РТ,
заместитель председателя
организационного комитета
Международной научной
Казанской мультikonференции,
д.т.н., профессор



Р.Н. Минниханов
2024 г.

М.П.

г. Казань

04 июня 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

квалификационной комиссии

по тематике диссертационной работы Петрова Дмитрия Юрьевича
«Методология и программно-информационное обеспечение автоматизированного
управления многостадийным производством высококачественного листового стекла»
на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Присутствовали:

1. Ахмадиев Фаил Габдулбарович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой прикладной математики института транспортных сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет;
2. Богомолов Алексей Валерьевич, д.т.н., профессор, Главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН;
3. Буддакова Татьяна Ивановна, д.т.н., профессор, каф. ИУ6 «Компьютерные системы и сети», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана;
4. Вешнева Ирина Владимировна, д.т.н., доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий в обучении, Факультет компьютерных наук и информационных технологий, Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского;
5. Виноградов Геннадий Павлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры Информатики и прикладной математики, Тверской государственный технический университет;
6. Гермашев Илья Васильевич, д.т.н., профессор, профессор Волгоградского государственного университета;
7. Дегтярев Геннадий Лукич, д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматики и управления, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ;
8. Зиятдинов Надир Низамович, д.т.н., профессор, профессор кафедры системотехники, институт управления, автоматизации и информационных технологий, Казанский национальный исследовательский технологический университет;

9. Катасёв Алексей Сергеевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры систем информационной безопасности, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ;
10. Котенко Игорь Витальевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН;
11. Кравец Алла Григорьевна, д.т.н., профессор, профессор кафедры САПР и ПК, Волгоградский государственный технический университет;
12. Лившиц Михаил Юрьевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», Самарский государственный технический университет;
13. Плешивцева Юлия Эдгаровна, д.т.н., профессор, профессор Самарского государственного технического университета;
14. Проталинский Олег Мирославович, д.т.н., профессор, профессор Московского энергетического университета (МЭИ);
15. Славин Олег Анатольевич, г.н.с., д.т.н., Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»;
16. Степанов Михаил Федорович, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.;
17. Хоперсков Александр Валентинович, д.ф.м.н., профессор, зав. кафедрой Волгоградского государственного университета;
18. Хранилов Валерий Павлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Компьютерные технологии в проектировании и производстве», Институт радиоэлектроники и информационных технологий, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева;
19. Чернышев Сергей Леонидович, д.т.н., профессор, профессор Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана;
20. Чистякова Тамара Балабековна, д.т.н., профессор, зав. кафедрой САПРиУ, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет);
21. Щербаков Максим Владимирович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой САПР и ПК, Волгоградский государственный технический университет;
22. Ющенко Аркадий Семенович, д.т.н., профессор, профессор Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

В представленной диссертационной работе решается проблема разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления многостадийным производством высококачественного листового стекла на основе широкого применения новых информационных технологий, разработки и практического применения математических и компьютерных моделей для автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью ХТП.

В диссертации получены новые научно-технических результатов:

1. Предложены методологические основы построения цифровых двойников автоматизированных многостадийных непрерывных производств, в основе которой

средства инжиниринга, обеспечивающие оценку проектных решений, управление технологическими процессами в реальном времени и прогнозирование аварийных ситуаций. Отличительной особенностью предложенной методологии является применение системного анализа автоматизированных многостадийных непрерывных производств, формализация описания организационно-технической, информационной и функциональных структур и математическая модель состояний жизненного цикла непрерывного производства.

2. Разработана концептуальная модель организационных уровней управления автоматизированного многостадийного производства высококачественного листового стекла, которая получена на основе процессного подхода к разработке цифрового двойника, формализации представления. Основными элементами модели являются диаграммы, представленные нотациями IDEF0 и BPMN 2.0. Отличительной особенностью предложенной модели является учет уровней RAMI 4.0 при описании автоматизированного многостадийного производства высококачественного листового стекла.

3. Предложена комплексная модель цифрового двойника организационных уровней управления автоматизированного многостадийного производства высококачественного листового стекла, которая отличается использованием: модели системной динамики для описания функционирования производства и отгрузки листового стекла, агентной модели для учета переходов на производство другого типа стекла, дискретно-событийной модели для формирования портфелей заказов листового стекла одного типа.

4. Разработаны математические модели для оценки параметров стекольной шихты, позволяющие определить соответствие шихты рецепту и качество ее смешивания (однородности). В отличие от существующих математических моделей, оценивающих параметры стекольной шихты, предложенная модель содержит переменные, показывающие ошибки дозаторов сырьевых материалов, и использует сигмоидальную функцию активации нейронов в первом слое и линейную во втором.

5. Предложена вейвлет-нейронно-эвристическая процедура и алгоритм диагностики точечных дефектов листового стекла. Отличительной особенностью процедуры является комплексное использование методов вейвлет-анализа и искусственных нейронных сетей для обеспечения автоматизированной идентификации дефектов листового стекла в реальном времени.

6. Разработана математическая модель формования листового стекла, необходимая для визуализации технологического процесса формования листового стекла в цифровом тренажере для обучения операторов действиям в аварийных ситуациях. В отличие от существующих математических моделей растекания листового стекла, предложенная модель содержит переменные, учитывающие воздействие бортоформирующих машин на технологический процесс формования.

7. Разработана математическая модель для определения минимальной производительности вентиляторов для заданного режима отжига листового стекла, ее применение в составе автоматизированной системы управления обеспечит экономию электроэнергии, потребляемой вентиляторами, при обеспечении требований по остаточным напряжениям в стекле.

8. Предложена архитектура комплекса проблемно-ориентированных программ для создания цифрового двойника производства с учетом требований стандартов области разработки автоматизированных систем управления непрерывными технологическими

процессами и управления их жизненным циклом. Применение комплекса проблемно-ориентированных программ позволит сократить время проектирования и уменьшить количество необоснованных проектных решений.

9. Разработаны архитектуры программных комплексов идентификации дефектов листового стекла и цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла действиям в аварийных ситуациях.

10. На основе проведенных исследований комплексной модели цифрового двойника организационных уровней управления автоматизированного многостадийного производства высококачественного листового стекла определены диапазоны значений показателей производства. Согласно выполненным исследованиям использование комплексной модели позволяет сократить простой производственной линии на 2% в год и прогнозировать остатки на складе с точностью 0,95 на периоде прогнозирования 1 год. Применение результатов моделирования обеспечивает поддержку принятия решений по оптимизации планирования производства разных типов и размеров стекол за счет сокращения переходов с одного технологического режима на другой.

11. Полученные теоретические и практические результаты явились основой методов повышения безопасности и эффективности производства листового стекла, которые могут быть применены при разработке цифровых двойников для повышения энергоресурсоэффективности автоматизированных многостадийных химических и металлургических производств на основе оценки проектных решений, управления технологическими процессами в реальном времени, прогнозирования аварийных ситуаций и обучения производственного персонала.

Совокупность методов, методик и алгоритмов, полученных с использованием интеллектуальных технологий, направлены на повышение эффективности и безопасности управления многостадийным производством высококачественного листового стекла, в том числе при аварийных ситуациях, что обеспечивается оценкой внешних и внутренних воздействующих факторов на производство, прогнозированием условий функционирования производства.

Содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, соответствует требованиям ВАК при Минобрнауки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Рекомендуется:

- доработать точность формулировок в презентации;
- уточнить определение задачи оптимального управления;
- дать определение и обосновать необходимость применения всех вводимых соискателем новых понятий, например, логико-информационной модели;
- подробно обосновать практическую значимость работы.

Руководитель рабочей группы, проф.
региональный представитель МНК ММТТ-37
по г. Казани

 Катарсёв А.С.

Приложение 3. Глоссарий основных терминов и понятий

1.	Аберрация линз	искажения света, вызванные оптической системой	Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: “Техносфера”, 2006. 1071с/
2.	Авария	– Разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ. – Мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий.	Руководящий документ. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // В сборнике документов «Декларирование промышленной безопасности и оценка». – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность» при Госгортехнадзоре России, 2003. Серия 27, вып.3. С. 5–27. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр.– М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России, 2001. Вып.10. 60 с.
3.	Автоматизированная система	представляет собой организационно-техническую систему, обеспечивающую выработку решений на основе автоматизации информационных процессов в различных сферах деятельности (управление, проектирование, производство и т.д.) или их сочетаниях. В зависимости от сферы автоматизируемой деятельности АС разделяют на: 1) автоматизированные системы управления (ОАСУ, АСУП, АСУ ТП, АСУ ГПС и др.); 2) системы автоматизированного проектирования (САПР); 3) автоматизированные системы научных исследований (АСНИ); 4) АС обработки и передачи информации (АСОИ);	РД 50-680-88

		5) автоматизированные системы технологической подготовки производства (АСТПП); 6) автоматизированные системы контроля и испытаний (АСК); 7) системы, автоматизирующие сочетания различных видов деятельности	
4.	Автоматизированное структурно логическое моделирование (АСМ)	Специальное научное направление и технология, в основе которых лежат теория автоматизированного структурно-логического моделирования, общий логико-вероятностный метод системного анализа, аппарат схем функциональной целостности, алгоритмы, программы, программные комплексы и методики построения с помощью ЭВМ математических моделей и расчета показателей устойчивости (надежности, живучести, безопасности) эффективности и риска функционирования системных объектов большой размерности и высокой структурной сложности.	Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем: учебное пособие. Л.:ВМА, 1988. 68 с.
5.	Агрегирование	объединение составных частей системы в рамках общей функциональной задачи.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2021.
6.	Адекватность	соответствие математической модели целям исследования по уровню сложности и организации, а также соответствие реальной системе относительно выбранного множества свойств. Исходный вариант модели предварительно проверяется по следующим основным аспектам: • Все ли существенные параметры включены в модель? • Нет ли в модели несущественных параметров? • Правильно ли отражены функциональные связи между параметрами? • Правильно ли определены ограничения на значения параметров? Для установления соответствия создаваемой модели оригиналу используются следующие пути: • сравнение результатов моделирования с отдельными экспериментальными результатами, полученными при одинаковых условиях;	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с. Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.

		• использование других близких моделей; • сопоставление структуры и функционирования модели с прототипом. Главным путем проверки адекватности модели исследуемому объекту выступает практика. Однако она требует накопления статистики, которая далеко не всегда бывает достаточной для получения надежных данных. При этом полагают, что адекватная модель должна достаточно точно описывать <i>качественные и количественные</i> свойства моделируемого объекта (процесса): 1) на 1-м этапе модель проверяется на целесообразность использования – качественная проверка; 2) 2-м этапе модель оценивается количественно — непосредственная проверка на адекватность. Заключение об адекватности модели базируется на методах <i>статистического анализа</i> эксперимента.	Моделирование химико-технологических процессов в производстве неорганических веществ: учеб. пособие / В.Ю. Прокофьев, А.В. Кунин, Н.Е. Гордина; Иван. гос. хим.-технол. ун-т, – Иваново, 2019. 127 с.
7.	Алгоритм	набор процедур и инструкций, описывающих порядок действия для достижения требуемых результатов, в том числе результатов по оптимальному управлению, анализу и оптимизации техногенноприродных систем или оценки воздействия на окружающую среду опасных химических веществ.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021.
8.	Алгоритмическое обеспечение	совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых в системе для решения задач и обработки информации. Математическое обеспечение состоит из алгоритмического и программного.	Современные технологии и технические средства информатизации / О. В. Шишов. - Москва: ИНФРА-М, 2022. - 460,
9.	Анализ дерева неисправностей (FTA)	– Совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот нежелательного события, с помощью которых определяются все пути его реализации. Используется графическое изображение. – Является нисходящим методом анализа надежности продукции. Он предназначен для идентификации и анализа условий и факторов, которые вызывают или способствуют появлению нежелательного результата и влияют на эффективность, безопасность, экономичность и другие характеристики системы .	ГОСТ Р 51901 – 2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт России, 2002. 22 с. ГОСТ Р 51901.5–2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. – М.: Стандартинформ, 2005. 43 с.

10.	Анализ дерева событий (ETA) (Event Tree Analysis)	– Совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот, в которых используется индуктивный подход с целью перевода различных иницирующих событий в возможные исходы. – Распространяется на ряд возможных последствий реализации события или отказа системы. Эффективным может быть соединение дерева событий с деревом неисправностей. Корень дерева событий может быть вершиной дерева неисправностей. Эта комбинация иногда называется анализом причины и следствий, в котором FTA используют для анализа причин, а ETA – для анализа последствий реализации события. Чтобы оценить серьезность последствий, которые следуют за реализацией события, необходимо идентифицировать, исследовать и определить вероятность всех возможных последствий.	ГОСТ Р 51901 – 2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт России, 2002. 22 с. ГОСТ Р 51901.5–2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. – М.: Стандартинформ, 2005. 43 с.
11.	Анализ риска (рисков) аварии (risk analysis)	– Процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды. – Системный подход к определению величины риска. – Систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска (Примечание – анализ риска обеспечивает базу для оценивания риска, мероприятий по снижению риска и принятие риска).	РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр.– М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России, 2001. Вып.10. 60 с. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 19791–2008. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Оценка безопасности автоматизированных систем. – М.: Стандартинформ, 2010. 121 с. ГОСТ Р 51901 – 2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт России, 2002. 22 с.

12.	Аналитическая форма математической модели	- запись модели в виде результата решения исходных уравнений модели. Обычно модели в аналитической форме представляют собой явные выражения выходных параметров как функций входов и переменных состояния. Для <i>аналитического</i> моделирования характерно то, что в основном моделируется только функциональный аспект системы. При этом глобальные уравнения системы, описывающие закон (алгоритм) ее функционирования, записываются в виде некоторых аналитических соотношений (алгебраических, интегродифференциальных, конечноразностных и т.д.) или логических условий. Аналитическая модель исследуется несколькими методами: • аналитическим, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными состояния системы; • численным, когда, не умея решать уравнения в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных (напомним, что такие модели называются цифровыми); • качественным, когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
13.	Аппаратное обеспечение	Материальная часть вычислительной системы, включающая в себя электрические и электронные элементы (например, приборы и схемы), электромеханические элементы (например, дисководы) и механические элементы (например, стойки).	
14.	Безопасность (safety)	– Состояние объекта, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений; – Отсутствие недопустимого риска.	Руководящий документ. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // В сборнике документов «Декларирование промышленной безопасности и оценка». – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность» при Госгортехнадзоре России, 2003. Серия 27, вып.3. С. 5–27.

			ГОСТ Р МЭК 61508-4–2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. 21 с.
15.	Безотказность	Способность изделия выполнить требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях. (Примечания: Данные условия – климатические, технические или экономические обстоятельства; обычно предполагают, что в начале интервала времени изделие в состоянии выполнить требуемую функцию).	ГОСТ 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050 (191): 1990-12 (NEQ). // Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2010. 27 с.
16.	Блок-схема (структурная схема) безотказности (Reliability block diagram (RBD))	– Графическое представление изделия в виде блоков, показывающее, как неисправности составных частей и их комбинации влияют на состояние изделия. – RBD (структурная схема надежности) представляет собой графическое изображение работоспособного состояния системы. RBD показывает логическую связь функционирующих компонентов, необходимых для успешной работы системы (далее – успех системы)	ГОСТ 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050 (191): 1990-12 (NEQ). // Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2010. – 27 с. ГОСТ Р 51901.14–2007 (МЭК 661078:2006). Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. – М.: Стандартинформ, 2008. 23 с.
17.	Валидация модели изделия	Подтверждение адекватности модели моделируемому изделию.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
18.	Валидация программного обеспечения компьютерного моделирования	Подтверждение того, что программное обеспечение компьютерного моделирования в заявленной области применения адекватно с заданной степенью точности выполняет подготовку исходных данных, расчеты и обработку результатов таких расчетов.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
19.	Вейвлет-преобразование	интегральное преобразование, представляющее собой свертку вейвлет-функции с сигналом, которая переводит	

		сигнал из временного представления в частотно-временное.	
20.	Верификация программного обеспечения, компьютерного моделирования	Подтверждение того, что программное обеспечение компьютерного моделирования выполняет подготовку исходных данных, расчеты и обработку результатов таких расчетов в соответствии с указанной математической моделью.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
21.	Взаимосвязь уровней автоматизации		Петров Д.Ю., 2004
22.	Выполняемые функции составляют процессы	целесообразно рассматривать отдельно процессы, функции, структуры. В свою очередь, процессы сводятся к анализу потоков различных видов: • материальный поток; • поток энергии; • поток информации; • смена состояний.	
23.	Глубокое обучение	совокупность методов машинного обучения (с учителем, с частичным привлечением учителя, без учителя, с подкреплением), основанных на обучении представлением, а не специализированных алгоритмах, с решением конкретных задач по созданию сложных иерархических представлений посредством эффективного обучения архитектур с неограниченным количеством слоёв.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
24.	Декомпозиция	представление системы в виде совокупности подсистем, состоящих из более простых элементов. Стратегии <i>Функциональная декомпозиция.</i> <i>Декомпозиция по жизненному циклу</i> <i>Декомпозиция по физическому процессу.</i> <i>Декомпозиция по подсистемам (структурная декомпозиция).</i>	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с. Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.

25.	Декомпозиция по жизненному циклу	изменение закона функционирования подсистем на разных этапах цикла существования системы от рождения до гибели	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
26.	Декомпозиция по физическому процессу	шаги выполнения алгоритма функционирования подсистемы, стадии смены состояний.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
27.	Делегирование полномочий	передача части функций и прав принятия решений нижестоящим системам управления	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
28.	Дерево неисправностей (FTA)	– Организованное графическое представление условий или других факторов, вызывающих нежелательное событие, называемое вершиной событий. – Систематизированное графическое представление условий и факторов, вызывающих или способствующих появлению ожидаемого итога – завершающего события.	ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2005. 11 с. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ деревьев неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2011. 22 с
29.	Дерево решений	графическое изображение последовательности решений и состояний среды с указанием соответствующих вероятностей и выигрышей для любых комбинаций альтернатив и состояний среды.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с.
30.	Дерево событий (Event Tree)	Деревья событий (Event Tree) являются графическими моделями, которые упорядочивают и отображают события протекания аварии (выполнение функций безопасности или работу систем) согласно требованиям по ослаблению исходных событий. Они показывают, как среагируют системы АС на рассматриваемое исходное событие, будут ли выполнены при этом функции безопасности, условия безопасной эксплуатации и что произойдет в итоге, как отразится исходное событие на ядерно-опасном объекте. Каждое дерево событий включает диаграмму состояний (граф) и	http://www.bestreferat.ru/referat-111856.html

		таблицу, поставленные в однозначное соответствие друг другу. Диаграмма состояний (граф) представляет собой систему горизонтальных и вертикальных линий, развивающуюся слева направо вдоль последовательно составленных ячеек таблицы. В левой крайней ячейке таблицы указывается исходное событие или его условное обозначение, в последующих — промежуточные события или их условные обозначения. Разветвление горизонтальной линии в пределах какой-либо ячейки таблицы означает либо осуществление (верхняя ветвь), либо неосуществление (нижняя ветвь) события, указанного в ячейке. В правой части диаграммы у соответствующих ветвей указываются возможные конечные состояния (endstate).	
31.	Дерево целей	использование иерархической структуры, полученной путем разделения общей цели на подцели, а их, в свою очередь, — на более детальные составляющие (новые подцели, функции и т. д.).	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с
32.	Дефект	Каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям	ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения
33.	Дискретная управляемая система	система, в которой на вход хотя бы одной подсистемы (компонента или звена) подаётся дискретный сигнал.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с
34.	Достоверность	обоснованность, доказательность и бесспорность знания; применительно к результатам эксперимента достоверным считается эксперимент, результаты которого теоретически корректны и не вызывают сомнений.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с
35.	Жизненный цикл изделия	Совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации.	ГОСТ Р 56136-2014, статья 3.16
36.	Задача (в области инжиниринга)	требуемое, рекомендуемое или допустимое действие, призванное внести вклад в достижение одного или нескольких результатов процесса или деятельности.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-

			технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2021. 442с
37.	Задача анализа	нахождение различного рода свойств системы или среды, окружающей систему.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
38.	Задача выполнения программы	перевод системы в требуемое состояние в условиях, когда значения управляемых величин изменяются по известным детерминированным законам.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
39.	Задача декомпозиции	представление системы в виде подсистем, состоящих из более мелких элементов.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
40.	Задача оптимизации	удержание или перевод системы в состояние с экстремальными значениями характеристик при заданных условиях и ограничениях.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
41.	Задача синтеза системы	создание, или построение, системы, фактически выполняющей преобразование, по определённому алгоритму и по описанию закона преобразования	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
42.	Задачи системного анализа в процессе создания ИС	входят задачи декомпозиции, анализа и синтеза. <i>Задача декомпозиции</i> означает представление системы в виде подсистем, состоящих из более мелких элементов. Часто задачу декомпозиции рассматривают как составную часть анализа. <i>Задача анализа</i> состоит в нахождении различного рода свойств системы или среды, окружающей систему. Целью анализа может быть определение закона преобразования информации, задающего поведение системы. В последнем случае речь идет об <i>агрегации</i> (композиции) системы в один-единственный элемент. <i>Задача синтеза</i> системы противоположна задаче анализа. Необходимо по описанию	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.

		закона преобразования построить систему, фактически выполняющую это преобразование по определенному алгоритму. При этом должен быть предварительно определен класс элементов, из которых строится искомая система, реализующая алгоритм функционирования.	
43.	Задачами теории управления	• синтез структуры и параметров объекта управления, соответствующих цели (закону функционирования) создаваемой системы с управлением; • синтез структуры и параметров управляющей системы, т.е. построение структуры управления с учетом ограничений по затратам различного вида (численность управленческого персонала и др.); - определение мест размещения центров обработки информации; определение массивов информации, подлежащих передаче, хранению и обработке; • синтез структуры и параметров системы связи.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
44.	Задачи управления	К задачам управления относятся целеполагание, стабилизация, выполнение программы, слежение и оптимизация	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
45.	Жизненный цикл ИС	Состоит из проектирования, изготовления, ввода в эксплуатацию, эксплуатации, наращивания возможностей (модернизация), вывода из эксплуатации (замена), уничтожения	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
46.	Идентификация	Установление соответствия конкретного объекта образцу и (или) его описанию	ГОСТ Р 51293-99 Идентификация продукции. Общие положения
47.	Идентификация модели (model identification).	Под идентификацией модели принято понимать выбор переменных модели, а также параметров ее уравнений с последующей их оценкой на основе статистических данных, полученных в результате наблюдения или эксперимента (см. Оценка параметров модели). (model identification). Под идентификацией модели принято понимать выбор переменных модели, а также параметров ее уравнений с последующей их оценкой на основе статистических данных, полученных в результате наблюдений	https://economic_mathematics.academic.ru/1709/Идентификация_модели

		ия или эксперимента (см. Оценка параметров модели).	
48.	Имитационное моделирование	При <i>имитационном</i> моделировании воспроизводится алгоритм функционирования системы во времени - поведение системы, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы. Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и другие, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. Имитационное моделирование может быть положено в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза систем, когда требуется создать систему с заданными характеристиками при определенных ограничениях.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
49.	Принципы Industry 4.0	Концепция четвертой промышленной революции базируется на четырех принципах: - функциональной совместимости человека и машины - возможности контактировать напрямую через интернет; - прозрачности информации и способности систем создавать виртуальную копию физического мира; - технической помощи машин человеку - объединения больших объемов данных и выполнения ряда небезопасных для человека задач; - способности систем самостоятельно и автономно принимать решения.	Тарасов Иван Владимирович Индустрия 4. 0: понятие, концепции, тенденции развития // Стратегии бизнеса. 2018. №6 (50). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/industriya-4-0-ponyatie-kontseptsii-tendentsii-razvitiya (дата обращения: 10.10.2023).
50.	Идентификация объекта управления	это распознавание или узнавание объекта через построение его моделей.	
51.	Инженерное дело	Профессиональная деятельность, связанная с применением систематического, строгого, количественного подхода для создания и	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективн

		применения информации о физических объектах, системах, процессах и их взаимодействии в целях создания новых сущностей.	ости химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
52.	Инжиниринг	Инженерно–консультационная деятельность, содержанием которой является решение инженерных задач, связанных с созданием или совершенствованием продукции, систем и процессов. Предметом инжиниринга является не продукция, не проектирование и не производство продукции, а интеллектуальный процесс решения творческих (инженерных) задач, связанных с проектированием и организацией процессов производства продукции.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективн ости химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
53.	Интеллектуаль ный анализ данных	вычислительный процесс, который извлекает закономерности, анализируя количественные данные с разных точек зрения и измерений, классифицируя их и суммируя потенциальные взаимосвязи и воздействия.	
54.	Интенсивность	удельный показатель функционирования, или средняя величина во времени, каких–либо характеристик процесса, явления, действия и т. п.	
55.	Интернет вещей	– — инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на неё.	
56.	Информацион ная система	– совокупность средств информационной техники и людей, объединённых для достижения определённых целей.	
57.	Информация (в области инжиниринга)	– документированные и логически организованные знания, данные и сведения, отображающие явления и законы природы, общества и мышления, получаемые и применяемые в области инжиниринга. В области инжиниринга важное значение имеет и представление информации, как меры уменьшения неопределённости в отношении свойств и состояния сущности, представляющей интерес для субъекта.	
58.	Искусственны й интеллект	– моделируемая (искусственно воспроизводимая) интеллектуальная деятельность мышления человека.	
59.	Качество	– совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворить установленные и предполагаемые потребности. –	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.:

		– совокупность существенных свойств объекта, – обуславливающих его пригодность для использования по назначению. – Оценка качества может производиться по одному интегральному – свойству, выражаемому через обобщенный показатель – качества системы	Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
60.	Классификация	– Осмысленный порядок вещей, явлений, разделение их на разновидности согласно каким-либо важным признакам.	Философский словарь / Под ред. И.Т. Фролова. - 4-е изд.-М.: Политиздат, 1981. – 445 с.
61.	Ключевые показатели производительности	– определённые на глобальном уровне показатели, рассчитываемые на основе первичных исходных данных о производственно–финансово–экономической деятельности предприятия, позволяющих оценивать фактическое состояние и изменение показателей эффективности всех бизнес–процессов экономики, социальной и экологической деятельности	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
62.	Компьютерная модель	– это программно–информационная реализация алгоритмов численного решения систем уравнений исходной математической модели объекта.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с
63.	Компьютерное моделирование	– – это программно-алгоритмическая реализация разработанной математической модели.	Мешалки В.П.
64.	Критерии адекватности компьютерной модели	– Количественная мера соответствия модельных и экспериментальных результатов. $S = \int_a^b \sum_{j=1}^n (C_j^2 - \bar{C}_j^2)^2 dr_i \quad (4.68)$ – критерий адекватности является функцией переменных и параметров k_i. Варьируя по определенному алгоритму параметры k_i, можно получить минимальное значение критерия S, что будет соответствовать наилучшему совпадению расчетных и экспериментальных результатов. – Критерий адекватности в форме (4.68) носит название интегрального квадратичного критерия. Его достоинством является учет отклонений обоих знаков и безусловное наличие минимума у функции такого рода.	Моделирование химико-технологических процессов в производстве неорганических веществ: учеб. пособие / В.Ю. Прокофьев, А.В. Кунин, Н.Е. Гордина; Иван. гос. хим.-технол. ун-т, – Иваново, 2019. – 127 с.
65.	Критерий отказа	– Заранее оговоренные признаки нарушения работоспособного состояния, по которым принимают решение о факте наступления отказа.	ГОСТ 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050 (191): 1990-12

			(NEQ). // Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2010. 27 с.
66.	Критерий эффективности	– - обобщенный показатель и правило выбора лучшей системы (лучшего решения). Например, $Y^* = \max \{Y_j\}$. Если решение выбирается по качественным характеристикам, то критерий называется решающим правилом.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
67.	критерия эффективности и управления	– Обобщенным критерием эффективности управления считается степень достижения цели функционирования системы.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
68. 4	Логико-Вероятностный Метод (ЛВМ)	– Метод расчета надежности судовых электроэнергетических систем, при котором структура СЭС описывается средствами математической логики, а количественная оценка ее надежности производится с помощью теории вероятностей.	Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем монография. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. – 278 с. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем: монография. – Л.: Судостроение, 1967. – 364 с.
69.	Локализация	– определение местонахождения/положения источника чего-либо в пространстве.	
70.	Математическая модель	– совокупность математических соотношений, уравнений, неравенств и т. п., описывающих основные закономерности, присущие изучаемому процессу, объекту или системе.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2022. 442с
71.	Математическая модель описания химических явлений	– Закон масс, закон энергии, закон сохранения импульса движения, кинетики, все это описывается. Пишутся системы уравнений, частных производств, полных.	
72.	Математическое	– это процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин //

	моделирование	математического объекта, называемого математической моделью. – построение математической модели объекта. Мешалки В.П.	М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
73.	Математическая модель реальной системы	– является тем абстрактным, формально записанным объектом, изучение которого возможно математическими методами, в том числе с помощью математического моделирования. –	Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. 2-е изд., перераб. Наука. 1978 г. 400 с.
74.	Математическая модель реальной системы	– под математической моделью реальной системы можно понимать конечное подмножество переменных $\{x(t), u(t), n(t), h(t)\}$ вместе с математическими связями между ними и характеристиками $y(t)$. Таким образом, цепочка уравнений объекта «вход-состояния- – выход» позволяет определить характеристики подсистемы – Формально состояние системы в момент времени $t_0 < t^* < T$ полностью определяется начальным состоянием $z(t_0)$, входными воздействиями $x(t)$, управляющими воздействиями $u(t)$, внутренними параметрами $h(t)$ и воздействиями внешней среды $n(t)$, которые имели место за промежуток времени $t^* - t_0$, с помощью глобальных уравнений динамической системы	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
75.	Менеджмент риска (risk management)	– Весь процесс идентификации, контроля и управления или минимизации подозрительных (неопределенных) событий, которые могут оказать негативное воздействие на ресурсы системы (менеджмент рисков обычно включает в себя анализ рисков, обработку рисков, принятие рисков, распространение информации о рисках /обмен или предоставление в совместное пользование информации о рисках между лицом, принимающим решение, и другими заинтересованными лицами). – Скоординированные действия по руководству и управлению организацией в отношении рисков (обычно менеджмент риска включает оценку рисков, обработку рисков, принятие рисков и коммуникацию рисков)	ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 19791–2008. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Оценка безопасности автоматизированных систем. – М.: Стандартиформ, 2010. 121 с. ГОСТ Р 51901 – 2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт России, 2002. 22 с.
76.	Метод	совокупность правил и принципов, рационально организованная с целью достижения определенного результата	

77.	Метод анализа структурной схемы надежности (RBD)	Является методом анализа надежности системы. RBD является графическим изображением представления логической схемы через подсистемы и/или компоненты и позволяет изобразить пути успеха работоспособности в виде логических связей подсистем/компонентов.	Можаев А.С. Гладкова И.А. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001) // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. – М.: РОСПАТЕНТ РФ, 12 мая 2003. – 17 с.
78.	Методика	обозначение более или менее планомерного способа достижения определённой цели, путь к цели, определённый способ и образ действия. некий готовый «рецепт», алгоритм, процедура для проведения каких-либо нацеленных действий. Методика отличается от метода конкретизацией приёмов и задач	энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона : в 86 т. (82 т. и 4 доп.). - СПб., 1890—1907
79.	Методология	совокупность методов, применяемых в какой-либо области человеческой деятельности	
80.	Многостадийное производство		
81.	Модель	объект, который имеет сходство в некоторых отношениях с прототипом и служит средством описания и/или объяснения, и/или прогнозирования поведения прототипа Функциональная модель системы описывает совокупность выполняемых системой функций, характеризует морфологию системы (ее построение) - состав функциональных подсистем, их взаимосвязи. Информационная модель отражает отношения между элементами системы в виде структур данных (состав и взаимосвязи). Поведенческая (событийная) модель описывает информационные процессы (динамику функционирования), в ней фигурируют такие категории, как состояние системы, событие, переход из одного состояния в другое, условия перехода, последовательность событий.	Мешалкин В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. — Смоленск: Универсум, 2022. 442с Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
82.	Моделирование	процесс исследования реальной системы, включающий построение модели, изучение ее свойств и перенос полученных сведений на моделируемую систему.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.

83.	Моделирование технологического процесса	в общем случае нужно определить потоки количества движения, энергии и массы между отдельными частями системы и окружающей средой.	Моделирование химико-технологических процессов в производстве неорганических веществ: учеб. пособие / В.Ю. Прокофьев, А.В. Кунин, Н.Е. Гордина; Иван. гос. хим.-технол. ун-т, – Иваново, 2019. – 127 с.
84.	Надежность	Свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания (Примечание – данный термин используется только для общего неколичественного описания надежности).	ГОСТ 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050 (191): 1990-12 (NEQ). // Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартиформ, 2010. 27 с.
85.	Наилучшая доступная технология	технологический процесс, технический метод, основанный на современных достижениях науки и техники, направленный на снижение негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду и имеющий установленный срок практического применения с учётом экономических, технических, экологических и социальных факторов	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2022. 442с
86.	Нейронная сеть (англ. Neural Network)	сеть примитивных обрабатывающих элементов, соединенных взвешенными связями с регулируемым весами, в которой каждый элемент производит значение, применяя нелинейную функцию к своим входным значениям, и передаёт его другим элементам или представляет его как выходное значение.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2022. 442с
87.	Обработка рисков (risk treatment)	Процесс выбора и реализации мер обеспечения безопасности (security controls) для измерения рисков	Можаев А.С. Гладкова И.А. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001) // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. – М.: РОСПАТЕНТ РФ, 12 мая 2003.
88.	Общий Логико-Вероятностный Метод (ОЛВМ)	Отличается от классических монотонных ЛВМ следующими основными положениями: • применением на структурном и аналитическом уровнях моделирования функционально полного набора логических операций ‘И’, ‘ИЛИ’, ‘НЕ’, т.е. полной	Можаев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем: учебное пособие. – Л.:ВМА, 1988. – 68 с.

		реализацией возможностей алгебры логики по построению как всех видов монотонных, так и нового класса немонотонных моделей функционирования сложных системных объектов и процессов; • использованием для структурного описания систем универсального аппарата схем функциональной целостности; • использованием не только гипотезы о независимости бинарных событий, но и учетом зависимостей событий, которые представляются с помощью аппарата групп несовместных событий.	Можаев А.С. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем // В сб.: Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем / под ред. проф. И.А. Рябинина. Препринт 101. – СПб.: ИПМАШ РАН, 1994. Ч. I. Вып.1. С. 23–53. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / Поленин В.И., Рябинин И.А., Свирин С.К. Гладкова И.А. / под ред. проф. А.С.Можаева. – СПб.: НИКА, 2011. 410 с.
89.	Обыкновенное дифференциальное уравнение	обыкновенные дифференциальные уравнения, неизвестные функции в которых были функциями одной переменной. Как и в обыкновенных дифференциальных уравнениях, порядок старшей производной, входящей в уравнение, называется порядком этого уравнения определение дифференциального уравнения опирается на понятие производной функции, а задача его решения является по сути обобщенной задачей интегрирования. В дифференциальном исчислении мы по заданной функции $y = y(x)$ находим ее производную $y'(x) = f(x)$, которая сама является некоторой функцией $f(x)$ переменной x.	Альпин Т.Ю., Даишев Р.А. Пособие по высшей математике: часть II / Альпин Т.Ю., Даишев Р.А. – Казань: Казан. ун-т, 2022. 42 с.
90.	Объект (item) Часть, Элемент	Любая часть, элемент, устройство, подсистема, функциональная единица, аппаратура или система, которую можно рассматривать самостоятельно.	ГОСТ Р 51901.12–2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. – М.: Стандартинформ, 2008.35 с.
91.	Опасный производственный объект (ОПО)	К категории опасных производственных объектов относятся объекты, на которых: 1) получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся,	Руководящий документ. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных

		транспортируются, уничтожаются следующие опасные вещества: воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные; 2) используется оборудование, работающее под давлением более 0.07 мегапаскаля или при температуре нагрева воды более 115 градусов Цельсия; 3) используются грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры; 4) получают расплавы черных и цветных металлов; 5) ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а так же работы в подземных условиях.	объектов» // В сборнике документов «Декларирование промышленной безопасности и оценка». – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность» при Госгортехнадзоре России, 2003. Серия 27, вып.3. С. 5–27.
92.	Отказ	Потеря способности изделия выполнить требуемую функцию	ГОСТ 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050 (191): 1990-12 (NEQ). // Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2010. 27 с.
93.	Оценивание риска (risk evaluation)	Процесс сравнения оцененного риска с данными критериями риска с целью определения значимости риска (примечание – оценивание риска может быть использовано для содействия решениям по принятию или обработке риска).	ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.
94.	Оценка величины риска (risk estimation)	Процесс присвоения значений вероятности и последствий риска	ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.
95.	Оценка риска аварии	Процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и/или окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания	РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. – М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России, 2001. Вып.10. 60 с.

96.	Оценка рисков (risk assessment)	– Процесс, включающий в себя идентификацию рисков, анализ рисков и оценивание рисков – Общий процесс анализа риска и оценивания риска.	Mozhaev A.S. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). – St.Petersburg: SPIIRAS, 1997. Tom 3. P.1109-1118. ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.
97.	параметр	– Количественная характеристика называется. Часто в литературе понятия «параметр» и «характеристика» отождествляются на том основании, что все можно измерить.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
98.	Подход	комплекс парадигматических, синтагматических и прагматических структур и механизмов в познании и/или практике, характеризующий конкурирующие между собой (или исторически сменяющие друг друга) стратегии и программы в философии, науке, политике или в организации жизни и деятельности людей.	Новейший философский словарь. — Минск: Книжный Дом. А. А. Грицанов. 1999.
99.	Показатель	- характеристика, отражающая качество у'-й системы или целевую направленность процесса (операции), реализуемого у-й системой: $YJ = WJ(n, X, u)$. Показатели делятся на <i>частные показатели качества</i> (или <i>эффективности</i>) системы $Y_{..}$, которые отражают г-е существенное свойство у'-й системы, и <i>обобщенный показатель качества</i> (или <i>эффективности</i>) системы $Y_{\bullet}$ - вектор, содержащий совокупность свойств системы в целом. Различие между показателями качества и эффективности состоит в том, что показатель эффективности характеризует процесс (алгоритм) и эффект от функционирования системы, а показатели качества - пригодность системы для использования ее по назначению.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
100	Показатели риска аварии	Основными количественными показателями риска аварии являются: – технический риск – вероятность отказа технических устройств с последствиями	РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных

		определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта. – ожидаемый ущерб – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии, за определенное время.	производственных объектов // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр.– М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России, 2001. Вып.10. 60 с.
101	Поток в сети	Неотрицательная вещественная функция, определенная на ребрах сети, обладающая дополнительными условиями консервативности (для каждой нетерминальной вершины сумма потока по входящим ребрам равна сумме потока по исходящим) и подчиненности пропускным способностям (поток по ребру не превышает его пропускной способности)	http://www.philosophy.ru/library/katr/asp/ref_2.doc
102	Приемлемый риск аварии	Риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических соображений. Риск эксплуатации объекта является приемлемым, если ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск	РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр.– М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России, 2001. Вып.10.60 с.
103	Принципы системного анализа	- это некоторые положения общего характера, являющиеся обобщением опыта работы человека со сложными системами. Наиболее часто к системным причисляют следующие принципы: принцип конечной цели, принцип измерения, принцип эквивалентности, принцип единства, принцип связности, принцип модульного построения, принцип иерархии, принцип функциональности, принцип развития (историчности, открытости), принцип децентрализации, принцип неопределенности.	
104	Проблема	сложный вопрос (или задача) требующий разрешения, изучения или исследования; несоответствие между существующим и	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективн

		требуемым (целевым) состоянием системы при данном состоянии среды в рассматриваемый момент времени. несоответствие между существующим и требуемым (целевым) состоянием системы при данном состоянии среды в рассматриваемый момент времени.	ости химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2022. 442с Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
105	Прогноз	научно обоснованное суждение о возможных состояниях системы в будущем и/или об альтернативных путях достижения целевого состояния и сроках их осуществления.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2022. 442с.
106	Продукция (продукт)	— конечный результат деятельности, направленной на создание материальных объектов, предназначенных для применения в качестве средства удовлетворения потребностей или требований.	
107	Проект	комплекс взаимосвязанных организационных и инженерно–технических мероприятий, предназначенных для достижения поставленных целей в течение ограниченного периода времени и при установленном бюджете.	
108	Производственный процесс	совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции.	ГОСТ 14.004 83]
109	Производство	Процесс превращения ресурсов в готовую продукцию.	Бизнес. Толковый словарь. — М.: "ИНФРА-М", Издательство "Весь Мир". Грэхэм Бетс, Барри Брайндли, С. Уильямс и др. Общая редакция: д.э.н. Осадчая И.М.. 1998.
110	Промышленная безопасность ОПО	Состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий.	Руководящий документ. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // В сборнике документов «Декларирование промышленной безопасности и оценка». – М.: ГУП НТЦ «Промышленная

			безопасность» при Госгортехнадзоре России, 2003. Серия 27, вып.3. С. 5–27
111	пространством состояний системы	Формально процесс функционирования как последовательная смена состояний интерпретируется как координаты точки в N-мерном фазовом пространстве. Причем каждой реализации процесса будет соответствовать некоторая фазовая траектория. Совокупность всех возможных значений состояний $\{z\}$ называется пространством состояний системы.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
112	Процедура	Последовательность действий, выполняемая закономерно, согласно точному предписанию	Математическая энциклопедия. - М.: Советская энциклопедия. И. М. Виноградов. 1977-1985.
113	Процессом	называется совокупность состояний системы $z(t_0), z(t_1), \dots, z(t_k)$, упорядоченных по изменению какого-либо параметра t , определяющего свойства системы. Формально процесс функционирования как	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
114	Распознавание	это отнесение исходных данных к определённому классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные, из общей массы данных	Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов, М. 1978
115	Реальное моделирование	При <i>реальном</i> моделировании используется возможность исследования характеристик либо на реальном объекте целиком, либо на его части. Такие исследования проводятся как на объектах, работающих в нормальных режимах, так и при организации специальных режимов для оценки интересующих исследователя характеристик (при других значениях переменных и параметров, в другом масштабе времени и т.д.). Реальное моделирование является наиболее адекватным, но его возможности ограничены.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
116	Ресурсы	используемые и потенциальные источники удовлетворения потребностей общества. Можно классифицировать все ресурсы по видам: • материальные и энергетические (первичные и вторичные), • интеллектуальные, • трудовые, • информационные, • финансовые,	

		• временные, • традиционные и • нетрадиционные. К ресурсам также относят: • трудовые коллективы; • инфраструктуру; • производственную среду; • информацию; • поставщиков и партнеров; • природные и финансовые ресурсы; • материальные ресурсы, такие как усовершенствованные производственные и вспомогательные аппаратурно–технические средства; • нематериальные ресурсы, такие как интеллектуальная собственность; • ресурсы и механизмы, содействующие инновационным постоянным улучшениям.	
117	Риск (risk)	– Потенциальная возможность нанесения ущерба организации в результате реализации некоторой угрозы с использованием уязвимостей активов или группы активов организации (Примечание – Риск определяется в терминах сочетания вероятности события и его последствий.). – Сочетание вероятности событий и его последствий (Примечание – термин «риск» обычно используется тогда, когда существует хотя бы возможность негативных последствий). – Сочетание вероятности причинения ущерба и тяжести этого ущерба	ГОСТ Р МЭК 61508-4–2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. 21 с. Mozhaev A.S. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). – St.Petersburg: SPIIRAS, 1997. Tom 3. P.1109-1118. ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.
118	Риск	событие, связанное с возникновением опасного явления или процесса, которое может произойти и привести к возникновению определённого ущерба.	

119	Риск аварии	Мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий.	РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. – М.: ГУП «НТЦ ПБ» Госгортехнадзора России, 2001. Вып.10. 60 с.
120	Сетевая система	Системный объект, условия реализации функций в котором представляются монотонными последовательно–параллельными и циклическими структурными схемами, с помощью которых определены детерминированные направления потоков событий, работ, мощности, вещества и т.п. Характерными примерами систем данного класса являются сетевые планы работ, электрические сети, системы водоснабжения и водоотведения.	Основные положения по разработке и применению систем сетевого планирования и управления. Межотраслевые инструктивно-методические материалы. –2-е изд., перераб. И доп. – М.: «Экономика», 1967. 86 с. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: «Энегтоатомиздат», 1989, 592 с.
121	Сеть	Представляет собой специальный вид графа, состоящего из вершин и ребер, соединяющих пары вершин. Каждое ребро имеет пропускную способность, которая ограничивает поток. В сети выделены две терминальные вершины – источник и сток	http://www.philosophy.ru/library/katr/asp/ref_2.doc
122	Система	это совокупность взаимосвязанных элементов, обладающая интегративными свойствами (эмерджентностью), а также способ отображения реальных объектов. — совокупность элементов и связей между ними, обладающая определённой целостностью.	Системный анализ в управлении: Учеб. Пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
123	Система качества	— совокупность организационной структуры, ответственности, процедур, методик, процессов и ресурсов, необходимых для общего руководства качеством.	
124	Система реального времени	система, которая должна реагировать на события во внешней, по отношению к системе, среде или воздействовать на среду в рамках требуемых временных ограничений	Гаричев С. Н., Ерёмин Н. А. Технология управления в режиме реального времени : в 2 ч.: учеб. Пос. для вузов

			:Ч. 1: М. : МФТИ, 2015. 196 с.
125	Система управления отходами —	взаимосвязанный комплекс мероприятий и действий по сбору, транспортировке, переработке, вторичному использованию или утилизации отходов и контролю всего процесса.	
126	Системность —	свойство объекта обладать всеми признаками системы.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
127	Системный анализ	— совокупность методов и средств исследования и разработки сложных и сверхсложных объектов, в том числе, и методов принятия обоснованных решений при проектировании, создании и управлении техническими, технологическими, экономическими и социальными системами.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум, 2022. 442с
128	Системный подход	методологическое направление в области разработки общей стратегии и методологии, а также неформализованных, или эвристических, и формализованных методов комплексного исследования процессов, явлений и объектов как сложных систем разных типов и классов. Системный подход предполагает, что взаимосвязь и взаимодействие элементов, процессов и явлений, происходящих в некоторой системе (объекте), обеспечивает появление у этой системы (объекта) принципиально новых свойств, которые не присущи её отдельным элементам, подсистемам, процессам и явлениям. Системный подход основан на одном из важнейших законов диалектического материализма — законе всеобщей взаимосвязи, взаимодействия и взаимообусловленности явлений и объектов в окружающей среде.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
129	Системотехника	- это совокупность методик и практик получения нового знания, а также инструментарий, с помощью которого проводится исследование, проектирование и управление сложными системами в процессе их жизненного цикла в условиях существенной неопределенности; это совокупность приемов обработки информации, позволяющих достичь целей исследования систем.	Моделирование в задачах анализа свойств систем : учебное пособие / Т. В. Афанасьева, Н. Г. Ярушкина. – Ульяновск : УлГТУ, 2019. 114 с.. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. - Л.:

		- выявляет устойчивые причинно-следственные связи между объектами, процессами и величинами и устанавливает принципы существования и действия сложных систем. Концепция системотехники состоит в упрощении сложных систем. Выделяют 3 основных принципа системотехники: физичности; моделируемости; целенаправленности.	Машиностроение, 1985. 199 с.
130	Системотехника основанная на модели (MBSE)	определяет системную инженерию на основе моделей (MBSE) как “подход к проектированию, который использует модели как неотъемлемую часть технической базы, включающей требования, анализ, проектирование, внедрение и проверку возможностей, системы и/или продукта на протяжении всего жизненного цикла приобретения”.	NDIA, 2011.
131	Ситуация	совокупность состояний системы и среды в один и тот же момент времени. Совокупность состояний системы и среды в один и тот же момент времени.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с. Системный анализ в управлении: Учеб. Пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
132	Сложная система	система, характеризующаяся тремя основными признаками: свойством робастности, наличием неоднородных связей и эмерджентностью.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с..
133	Совместимость	возможность взаимодействовать с другими комплексами на основе развитых интерфейсов для обмена данными с прикладными задачами в других системах.	
134	Состояние системы	- это множество значений характеристик системы в данный момент времени. Описание закона функционирования системы наряду с аналитическим, графическим, табличным и другими способами в ряде случаев может быть получено через состояние системы.	Системный анализ в управлении: Учеб. Пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.

		Формально состояние системы в момент времени $t_0 < t^* < T$ полностью определяется начальным состоянием $z(t_0)$, входными воздействиями $x(t)$, управляющими воздействиями $u(t)$, внутренними параметрами $h(t)$ и воздействиями внешней среды $n(t)$, которые имели место за промежуток времени $t^* - t_0$, с помощью глобальных уравнений динамической системы	
135	Способность	качество системы, определяющее её возможности по достижению требуемого результата на основе имеющихся ресурсов за определённое время.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с..
136	Стандартность	применительно к программному обеспечению означает его соответствие опубликованному стандарту, независимо от конкретного разработчика ПО.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
137	Структура	совокупность образующих систему элементов и связей между ними. <i>Структура</i> – совокупность образующих систему элементов и связей между ними. Это понятие вводится для описания подмодели Пси b. В структуре системы существенную роль играют связи. Так, изменяя связи при сохранении элементов, можно получить другую систему, обладающую новыми свойствами или реализующую другой закон функционирования.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с. Системный анализ в управлении: Учеб. Пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
138	Структуризация	совокупность упорядоченных внутренних взаимосвязей между элементами системы. Свойства и процесс функционирования системы в целом обусловлены не только свойствами составляющих её отдельных элементов, но и свойствами структуры этой системы	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с..
139	Схема функциональной целостности (СФЦ)	Графический аппарат структурно-логического представления исследуемых свойств сложных системных объектов различного назначения. Является основой Общего Логико-Вероятностного Метода, теории и технологии Автоматизированного Структурно-логического Моделирования.	Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем монография. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. 278 с.

140	Технические требования	Технический документ, устанавливающий требования, которые должны быть выполнены при производстве, поставке и приемке продукции, услуги или процесса для соответствия функциональным требованиям.	ГОСТ Р 410СО 13879-2009
141	Технологическая структура, или технологическая топология ХТС	строение и внутренняя форма организации системы, отражающая состав элементов и особенности взаимосвязей между ними. Технологическую структуру (технологическую топологию) ХТС формально можно охарактеризовать числом элементов определённого конструкционного типа, в которых протекают химико–энерготехнологические процессы, а также известным законом взаимосвязей между отдельными элементами и числом технологических потоков в системе.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
142	Технологические параметры ХТС	— совокупность физико–химических величин, характеризующих свойства, механизм и режимы функционирования ХТП, происходящих в системе.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
143	Технологический процесс	Часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда.	ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации
144	Требования к модели	1. Адекватность. 2. Соответствие модели решаемой задаче. 3. Упрощение при сохранении существенных свойств системы. 4. Соответствие между требуемой точностью результатов моделирования и сложностью модели. 5. Баланс погрешностей различных видов. 6. Многовариантность реализаций элементов модели. Разнообразие 7. Блочное строение.	Системный анализ в управлении: Учеб. Пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
145	Управление	процесс формирования целенаправленного поведения системы посредством информационных воздействий, вырабатываемых человеком или специальным управляющим устройством, регулятором.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
146	Управляемость	способность системы переходить за заданное время в требуемое состояние под влиянием управляющих воздействий.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем.

			- Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
147	Устойчивость (с позиций теории движения и смены состояний)	стойкость к внешним воздействиям, сбалансированность, стабильность, гомеостазис (способность системы возвращаться в равновесное состояние при выводе из него внешними воздействиями). Для сложных систем характерны различные формы структурной устойчивости (надёжность, живучесть и др.)	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
148	физико-химическая система	ФХС – сплошная многофазная многокомпонентная среда, распределённая в пространстве и переменная во времени, в каждой точке гомогенности которой и на границе раздела фаз происходит перенос вещества, энергии и импульса при наличии их источников (стоков).	
149	Функциональная безопасность (functional safety)	Часть общей безопасности, которая относится EUC (управляемое оборудование) и системам управления EUC и зависит от правильности функционирования Е/Е/РЕ (электрическая /электронная/ программируемая электронная) систем, связанных с безопасностью, систем обеспечения безопасности, основанных на других технологиях и внешних средств уменьшения риска	ГОСТ Р МЭК 61508-4–2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 21 с.
150	Функция организации	установление постоянных и временных связей между всеми элементами системы, определение порядка и условий их функционирования.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
151	Функция прогнозирования	снятие неопределённости относительно возможной структуры, свойств или закона функционирования системы в будущем.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
152	Функция управления	устойчивая упорядоченная совокупность операций, основанная на разделении труда в управляющей системе.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
153	Характеристика	то, что отражает некоторое свойство элемента системы. Область допустимых значений задается перечислением этих значений или функционально, с помощью правил	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Е

		вычисления (измерения) и оценки. Характеристики делятся на количественные и качественные в зависимости от типа отношений на множестве их значений. Характеристики элемента являются зависимыми переменными и отражают свойства элемента. Под <i>свойством</i> понимают сторону объекта, обуславливающую его отличие от других объектов или сходство с ними и проявляющуюся при взаимодействии с другими объектами.	мельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
154	Химико–технологический процесс	совокупность физико–химических явлений, осуществляющих химические и физические преобразования вещества, тесно взаимодействующих с определёнными энерготехнологическими явлениями.	
155	Химико-технологическая схема	ХТС – технологическая схема процесса, которая рассматривается как совокупность тесно связанных подсистем (процессов в отдельных аппаратах), имеющих единую цель функционирования и подчиняющихся принципам системного анализа, в частности комплексности и иерархической соподчиненности. В общем случае химико-технологический процесс (ХТП) формализуется как физико-химическая система – ФХС	
156	Химическое вещество	либо химический элемент, либо химическое соединение, существующее в природе или полученное искусственно.	
157	Целостность	один из основных принципов системного подхода, позволяющий рассматривать одновременно систему как единое целое и в то же время как подсистему для вышестоящих уровней иерархии.	
158	Цель	ситуация или множество ситуаций (состояний), которая должна быть достигнута при функционировании системы за определённый промежуток времени. ситуация или область ситуаций, которая должна быть достигнута при функционировании системы за определённый промежуток времени. Цель может задаваться требованиями к показателям результативности, ресурсоемкости, оперативности функционирования системы либо к траектории достижения заданного результата. Как правило, цель для системы	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.

		определяется старшей системой, а именно той, в которой рассматриваемая система является элементом.	
159	Ценность информации	— изменение вероятности достижения цели при получении дополнительной информации.	
160	Цикл управления	— совокупность функций управления, выполняемых в системе при изменении среды.	
161	Цифровая модель	численным способом, когда, не умея решать уравнения в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных (напомним, что такие модели называются цифровыми).	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
162	Цифровая платформа	Программно-технологическая платформа цифровых двойников применяется для создания цифровых моделей и ЦД, проведения цифровых (виртуальных) испытаний, применения результатов математического и компьютерного моделирования и организации совместной работы по созданию цифрового двойника изделия. Она включает - средства управления программным обеспечением компьютерного моделирования; - средства управления проектами; - средства сбора, обработки, анализа, визуализации, каталогизации, хранения, передачи компьютерных моделей и результатов компьютерного моделирования; - средства отслеживания всех изменений конструкторских, технологических решений и модификации компьютерных моделей и вариантов инженерных расчетов; - средства оформления результатов; - средства защиты данных и организации совместной работы участников проекта в соответствии с правами доступа; - средства компьютерного моделирования для планирования применения изделия по назначению, поддержки его технического обслуживания и ремонта.	ГОСТ Р 57700.37-2021
163	Цифровая промышленная платформа	Обеспечивает централизованный сбор и интеграцию данных о промышленных активах и использовании этих данных для создания интеллектуальных приложений и сервисов с помощью дополнителей	(Beverungen et al., 2019; Schermuly et al., 2019) https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-020-00681-w

			Pauli, T., Fielt, E. & Matzner, M. Digital Industrial Platforms. Bus Inf Syst Eng 63, 181–190 (2021). https://doi.org/10.1007/s12599-020-00681-w
164	Цифровая модель изделия	Система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.	ГОСТ Р 57700.37-2021
165	Цифровой двойник изделия (Digital Twin)	Система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. совокупность взаимосвязанных сложных многомасштабных компьютерных моделей (3D + время + физико-химические процессы) с высоким уровнем интерактивной адаптивной адекватности реальным материалам, реальным технологическим физико-химическим и производственно-организационным процессам и аппаратам (конструкциям, машинам, приборам ... / киберфизическим роботизированным системам). Высокий уровень адаптивности и адекватности означает, что цифровой двойник должен обеспечивать высокий уровень достоверности в требуемом доверительном интервале между результатами виртуальных вычислительных и физических / натурных экспериментов в пределах $\pm 5\%$ (именно в этом случае он имеет право называться цифровым двойником, в противном случае, это компьютерная модель, цифровой макет, цифровой прототип и т. д., которые создаются в рамках традиционного итерационного подхода – «проектирование и доводка изделий через многочисленные и дорогостоящие испытания»). Цифровой двойник должен и способен ответить на вопросы: «Где измерять?» и «Что измерять?», то есть указать критические зоны, в которых необходимо разместить датчики, и	ГОСТ Р 57700.37-2021 Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» Цифровая подстанция. – 2019. – № 12. – С. 20–25. [Электронный ресурс]. Доступно: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/09/cifrovye_dvyinii.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).]. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.

		критические характеристики, которые необходимо измерять (например, деформации, температуру, давление, виброперемещения, виброускорения и т. д.), а затем – хранить, обрабатывать, передавать и защищать большие объемы информации (Big Data). Цифровой двойник обеспечивает процесс генерации содержательных данных, в результате которого формируется smart big data. более того, цифровой двойник позволяет не только адекватно в реальном масштабе времени поведение реального объекта / продукта при всех режимах работы и произвольных внешних воздействиях (включая нормальные условия работы, нарушения нормальных условий работы, аварийные ситуации и пр.), но и с высокой степенью адекватности прогнозировать различные возможные и непредвиденные ситуации (включая их всевозможные комбинации / наложения). Следовательно, «цифровой двойник обладает предсказательными свойствами, в отличие от множества датчиков, которые лишь помогают сформировать «память» об уже случившихся событиях и не позволяют осуществлять те или иные прогнозы сложных явлений и ситуаций.	
166	Цифровой двойник производства	включает в себя все аспекты, от машин и контроллеров завода до целых производственных линий в виртуальной среде. Этот процесс моделирования можно использовать для предварительной оптимизации производства с помощью генерации кода ПЛК и виртуального ввода в эксплуатацию. В результате источники ошибок или сбоев могут быть идентифицированы и предотвращены до начала фактической эксплуатации. Это экономит время и закладывает основу для индивидуального массового производства, поскольку даже очень сложные производственные маршруты можно рассчитать, протестировать и запрограммировать с минимальными затратами и усилиями в очень короткие сроки.	https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/the-digital-twin.html
167	Цифровой двойник производительности	цифровой двойник производительности постоянно получает оперативные данные о продуктах или производственном предприятии. Это позволяет постоянно	https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/the-digital-twin.html

		отслеживать такую информацию, как данные о состоянии машин и данные об энергопотреблении производственных систем. В свою очередь, это позволяет выполнять профилактическое обслуживание для предотвращения простоев и оптимизации энергопотребления. Данные используются для разработки новых бизнес-моделей. Это создает полностью замкнутый цикл принятия решений для непрерывного процесса оптимизации.	
168	Цифровая тень (Digital Shadow)	представляют собой системы связей и зависимостей, приближенно описывающих поведение реального объекта / продукта, как правило, в нормальных условиях работы и содержащихся в избыточных больших данных (Big Data), которые получают с реального объекта / продукта при помощи большого количества датчиков и технологий промышленного интернета. Для формирования цифровой тени посредством выявления связей и зависимостей используются методы предиктивной аналитики. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор больших данных, но не позволяет прогнозировать ситуации, в которых реальный объект / продукт ещё не эксплуатировался – «цифровая тень обладает лишь свойством памяти». Для формирования цифровой тени 3D компьютерные модели, производных, как правило, не применяются, что и гарантирует ограниченность этого достаточно популярного подхода в сложных ситуациях.	Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 стр., ил.
169	Эвристика	метод решения задач, основанный на неформальных правилах опытных специалистов, обеспечивающий уменьшение объёма вычислений или получение результата, когда аналитические и вычислительные методы принятия решения бесполезны.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
170	Экстраполирование	процесс вычисления значения функции, находящегося за пределами ряда заданных значений.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.

171	Элемент	- это неделимая наименьшая функциональная часть исследуемой системы, включающая $\langle x, n, u, y, FS \rangle$ и представляемая как «черный ящик»	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
172	Элемент системы	некоторый объект (материальный, энергетический, информационный), обладающий рядом важных свойств и реализующий в системе определённый закон функционирования, внутренняя структура которого не рассматривается.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
173	Эмерджентность (целостность)	свойство системы, которое принципиально не сводится к сумме свойств элементов, составляющих систему и не выводится из них.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
174	Эффективность процесса	- степень его приспособленности к достижению цели.	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
175	Энергетическая эффективность	(энергоэффективность) — характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования топливно–энергетических ресурсов к затратам топливно–энергетических ресурсов, произведённым в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
176	Энергия	одно из основных свойств материи — мера её движения, а также способность выполнять (производить) работу.	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
177	Энергоёмкость	это количество энергии, необходимое для получения единицы какого–либо продукта или определённого результата, например, услуги	Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико–технологических систем. - Смоленск: Универсум. 2022. 442с.
178	Этапы анализа	1. Функционально-структурный анализ существующей системы, позволяющий сформулировать требования к создаваемой	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие

		системе. Он включает уточнение состава и законов функционирования элементов, алгоритмов функционирования и взаимовлияний подсистем, разделение управляемых и неуправляемых характеристик, задание пространства состояний Z, задание параметрического пространства T, в котором задано поведение системы, анализ целостности системы, формулирование требований к создаваемой системе. 2. Морфологический анализ - анализ взаимосвязи компонентов. 3. Генетический анализ - анализ предыстории, причин развития ситуации, имеющих тенденций, построение прогнозов. 4. Анализ аналогов. 5. Анализ эффективности (по результативности, ресурсоемкости, оперативности). Он включает выбор шкалы измерения, формирование показателей эффективности, обоснование и формирование критериев эффективности, непосредственно оценивание и анализ полученных оценок. 6. Формирование требований к создаваемой системе, включая выбор критериев оценки и ограничений.	/ В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
179	Этапы идентификации и модели кинетики химической реакции	1) получение экспериментальных данных; 2) формулирование гипотез о возможных механизмах реакции; 3) составление на основании предлагаемого механизма реакции кинетических уравнений для каждой гипотезы (разработка математического описания кинетики); 4) формулирование критерия адекватности математической модели кинетики по экспериментальным данным; 5) отыскание параметров математической модели кинетики, минимизирующих критерий адекватности для каждой из гипотез; 6) принятие в качестве рабочей той гипотезы, для которой критерий адекватности оказался наименьшим.	Моделирование химико-технологических процессов в производстве неорганических веществ: учеб. пособие / В.Ю. Прокофьев, А.В. Кунин, Н.Е. Гордина; Иван. гос. хим.-технол. ун-т, – Иваново, 2019. – 127 с.
180	этапы построения моделей	1. <i>Содержательное описание моделируемого объекта (концептуальной моделью)</i> 2. <i>Формализация операций</i> На основе содержательного описания определяется исходное множество характеристик системы и формированием целевой функции модели. 3. <i>Проверка адекватности модели.</i> Требование адекватности находится в противоречии с требованием простоты, и это	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.

		нужно учитывать при проверке модели на адекватность. 4. <i>Корректировка модели.</i> После внесения изменений в модель вновь выполняется оценка адекватности. 5. <i>Оптимизация модели.</i> Сущность оптимизации моделей состоит в их упрощении при заданном уровне адекватности. Основными показателями, по которым возможна оптимизация модели, выступают время и затраты средств для проведения исследований на ней.	
181	Этапы синтеза	1. Разработка модели требуемой системы (выбор математического аппарата, моделирование, оценка модели по критериям адекватности, простоты, соответствия между точностью и сложностью, баланса погрешностей, многовариантности реализаций, блочности построения). 2. Синтез альтернативных структур системы, снимающей проблему. 3. Синтез параметров системы, снимающей проблему. 4. Оценивание вариантов синтезированной системы (обоснование схемы оценивания, реализация модели, проведение эксперимента по оценке, обработка результатов оценивания, анализ результатов, выбор наилучшего варианта).	Системный анализ в управлении: Учеб. пособие / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин // М.: Финансы и статистика Год: 2002. 368с.
182	Эффективность применения	Способность удовлетворять требованиям к услуге с заданными количественными характеристиками. Эффективность, согласно стандарту ИСО 9000:2000, - соотношение достигнутых результатов и использованных ресурсов. Это практически соответствует определению, которое дает современный экономический словарь: "эффективность - относительный эффект (результативность) процесса, определяемый как отношение эффекта (результата) к затратам, обусловившим (обеспечившим) его получение"	ГОСТ 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050 (191): 1990-12 (NEQ). // Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартиформ, 2010. 27 с. ИСО 9000:2000, Райзберг Б.А., Лозовский Л.Ш., Стародубцев Е.Б. Современный экономический словарь. 2-е изд., испр. М.: ИНФРА-М, 1998).