

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
(ИМАШ РАН)



На правах рукописи

СКВОРЦОВА ДАРЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

МЕТОДОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация
производства

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант

д.т.н., Рагуткин А.В.

Москва, 2026 год

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	12
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ	26
1.1. Построение модели системы управления машиностроительным производством	26
1.2. Характеристика архитектур систем управления машиностроительным производством	34
1.3. Взаимосвязь электронных структур изделий и системой управления машиностроительным производством	75
1.4. Структурное представление взаимосвязи показателей качества продукции и систем управления машиностроительным производством	79
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1	88
ГЛАВА 2. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	91
2.1. Автоматизированная оценка уровня цифровой зрелости предприятий машиностроения с учетом модели жизненного цикла и иерархии процессов	91
2.2. Взаимосвязь параметров систем управления машиностроительным производством и объединенного множества параметров электронных структур изделия	104
2.3. Анализ комплекса критериев для оценки систем управления машиностроительным производством	111
2.4. Организация систем управления машиностроительным производством с использованием методов оптимизации	124
2.5. Модель оценки показателей систем управления машиностроительным производством методами нечеткой логики	149
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2	165

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ	169
3.1. Элементарная модель принятия решения при выборе конфигурации архитектуры системы управления производством	169
3.2. Критерии надежности архитектуры системы управления производством	181
3.3. Разработка метода организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков	198
3.4. Обобщенная структура системы поддержки принятия решений для выбора конфигурации архитектуры системы управления производством	203
3.5. Методы нормализации данных и свертка критериев оценки системы управления производством	207
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3	226
ГЛАВА 4. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ПРОДУКЦИИ	229
4.1. Формализация требований к системе управления производством на внешнем уровне представления	229
4.2. Оценка качества концептуального уровня системы управления производством	237
4.3. Оценка внутреннего уровня архитектуры системы управления производством	254
4.4. Оценка критериев архитектуры системы управления производством методами нечеткой логики	260
4.5. Оптимизация архитектуры системы управления производством методом комбинаторной оптимизации	268
4.6. Построение архитектуры системы управления производством на основе автономных элементов	273
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4	288

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ О СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ	293
5.1. Функциональные возможности аналитической платформы	293
5.2. Анализ данных о показателях архитектуры системы управления в режиме реального времени	302
5.3. Исследование эффективности организации производства в условиях рисков	321
5.4. Анализ устойчивости модели системы управления производством	323
5.5. Анализ качества модели архитектуры системы управления производством на основе автономных элементов	326
5.6. Практическая реализация и внедрение результатов диссертации	345
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5	355
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	358
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	360
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОБОБЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСА СВОЙСТВ РЕБЕР ГРАФА	395
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ	396
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПАРАМЕТРЫ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ КРИТЕРИЕВ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	397
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. КАСКАДНАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	419
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КРИТЕРИЕВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В SIMULINK	420
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	421
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА	428

ПРИЛОЖЕНИЕ И. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ	429
ПРИЛОЖЕНИЕ К. ПРАВИЛА ВЫБОРА МЕТОДА НОРМАЛИЗАЦИИ	432
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ АРХИТЕКТУРЫ СУ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РИСКА	433
ПРИЛОЖЕНИЕ М. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ПАО «ГАЗПРОМ АВТОМАТИЗАЦИЯ»	434
ПРИЛОЖЕНИЕ Н. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В ОАО «ОРБИТА»	435
ПРИЛОЖЕНИЕ П. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В ООО «ГЕНОН»	436
ПРИЛОЖЕНИЕ Р. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС	437

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ	автоматизированная система управления
БД	база данных
БП	бизнес-процесс
ВБР	вероятность безотказной работы
ГА	генетический алгоритм
ЖЦ	жизненный цикл
ИЛС	информационно-логистическая система
ИПИ	информационная поддержка изделия
ИС	информационная система
ИТ	информационные технологии
МА	муравьиный алгоритм
МБС	метод ближайшего соседа
МДП	динамическое программирование
МВГ	метод ветвей и границ
МТО	материально-техническое обеспечение
МЭК	Международная электротехническая комиссия
ПИБ	промышленный интернет вещей
ПО	программное обеспечение
САПР	система автоматизированного проектирования
СМО	система массового обслуживания
СППР	система поддержки принятия решений
СУ	система управления
ТМО	теория массового обслуживания
УЦЗ	уровень цифровой зрелости
ЭСИ	электронная структура изделия
ANSI	American National Standards Institute – Американский национальный институт стандартов
BI	Business Intelligence – бизнес-аналитика

BIM	Building Information Modeling – информационное моделирование зданий
BPMN	Business Process Model and Notation – нотация и модель бизнес-процессов
CAD	Computer-Aided Design – автоматизированное проектирование
CAE	Computer-Aided Engineering – автоматизированные инженерные расчеты
CALS	Continuous Acquisition and Life-cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла
CAM	Computer-Aided Manufacturing – автоматизированная подготовка производства
CAPP	Computer-Aided Process Planning – автоматизированное проектирование технологических процессов
CDL	Core Data Layer – ядро хранилища данных
CEN	Comité Européen de Normalisation – Европейский комитет по стандартизации
CIMOSA	Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture – открытая системная архитектура компьютерно-интегрированного производства
CPM	Corporate Performance Management – управление эффективностью деятельности компании
CRM	Customer Relationship Management – управление взаимоотношениями с клиентами
CRITIC	CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation – метод определения весов критериев через межкритериальную корреляцию
DMM	Digital Maturity Model – модель цифровой зрелости
DWH	Data Warehouse – хранилище данных
EAM	Enterprise Asset Management – управление активами предприятия

EAIP	Enterprise Application Integration Platform – платформа интеграции корпоративных приложений
ECM	Enterprise Content Management – управление цифровым контентом предприятия
EDMS	Electronic Document Management System – система управления документами предприятия
EIM	Enterprise Information Management – управление информацией предприятия
ERP	Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия
ESPRIT	European Strategic Programme on Research in Information Technology – Европейская стратегическая программа исследований в области информационных технологий
ETL	Extract, Transform, Load – извлечение, преобразование, загрузка (данных)
GEM	Generic Enterprise Models – общие модели предприятия
GERA	Generic Enterprise Reference Architecture – общая эталонная архитектура предприятия
GERAM	Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology – обобщенная эталонная архитектура и методология предприятия
HCA	Holonic Control Architecture – холоническая архитектура управления
HMS	Holonic Manufacturing System – холоническая производственная система
HMI	Human–Machine Interface – человеко-машинный интерфейс
HRM	Human Resource Management – управление человеческими ресурсами
IDEF	Integration DEFinition – методология интегрированного моделирования

IEC	International Electrotechnical Commission – Международная электротехническая комиссия
IFAC	International Federation of Automatic Control – Международная федерация автоматического управления
IFIP	International Federation for Information Processing – Международная федерация обработки информации
IIС	Industrial Internet Consortium – консорциум промышленного интернета
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture – эталонная архитектура промышленного интернета
IETM	Interactive Electronic Technical Manuals – интерактивные электронные технические руководства
IoT	Internet of Things – интернет вещей
ISA	International Society of Automation – Международное общество автоматизации
ISO	International Organization for Standardization – Международная организация по стандартизации
IVRA	Industrial Value Chain Reference Architecture — эталонная архитектура промышленной цепочки создания стоимости
KBSi	Knowledge Based Systems Inc. — системы, основанные на знаниях
KPI	Key Performance Indicators — ключевые показатели эффективности
MAD	Median Absolute Deviation – медианное абсолютное отклонение
MAE	Mean Absolute Error – средняя абсолютная ошибка
MASE	Mean Absolute Scaled Error – средняя абсолютная масштабированная ошибка
MAPE	Mean Absolute Percentage Error – средняя абсолютная процентная ошибка

MASCADA	Manufacturing Control Systems based on Autonomous Distributed Agents – системы управления производством на основе автономных распределенных агентов
MDC	Machine Data Collection – сбор данных от средств производства
Med-MAD	Median — Median Absolute Deviation – медиана и медианное абсолютное отклонение (робастная стандартизация)
MES	Manufacturing Execution System – система управления производством
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association – ассоциация решений для производственных предприятий
MIMOSA	Machinery Information Management Open Systems Alliance – альянс открытых систем управления информацией о машинах
MOMS	Manufacturing Operations Management System – система управления производственными операциями
MSE	Mean Squared Error – среднеквадратичная ошибка
ODM3	Organizational Digital Manufacturing Maturity Model – модель организационной зрелости цифрового производства
OEE	Overall Equipment Effectiveness – общая эффективность оборудования
OMG	Object Management Group – группа управления объектов
OSI	Open Systems Interconnection – взаимодействие открытых систем
PDL	Primary Data Layer – операционный слой первичных данных
PDM	Product Data Management – управление данными об изделии
PERA	Purdue Enterprise Reference Architecture – эталонная архитектура предприятия Университета Пердью
p-value	уровень значимости (вероятность ошибочного отклонения нулевой гипотезы)
PIP	Process Industry Practices – практика перерабатывающей промышленности

PLM	Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом изделия
PostgreSQL	объектно-реляционная система управления базами данных с открытым исходным кодом
PROSA	Product–Resource–Order–Staff Architecture – архитектура продукта, ресурса, заказа и персонала
RAMI 4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0 – эталонная архитектурная модель Индустрии 4.0
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных
SCM	Supply Chain Management – управление цепями поставок
SMAPE	Symmetric Mean Absolute Percentage Error – симметричная средняя абсолютная процентная ошибка
SQL	Structured Query Language – язык структурированных запросов
STEP	Standard for the Exchange of Product model data – стандарт обмена данными о модели изделия
TSDB	Time Series Database – база данных временных рядов
U-коэффициент Тейла	Theil's U coefficient – коэффициент точности прогноза относительно наивного метода
UML	Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Организация систем управления на машиностроительных предприятиях является актуальной задачей при адаптации к реалиям цифровой трансформации. Предприятия увеличивают уровень использования информационных технологий в целях повышения эффективности производств и множество используемых на предприятии информационных систем являются частью системы управления.

Однако процесс цифровизации, информатизации, автоматизации проходит без анализа поведения производственной системы с точки зрения теории систем управления, что приводит к потере устойчивости и накоплению ошибок управления. При этом организация самих автоматизированных систем управления также влияет на качество продукции. Информационные компьютерные технологии составляют неотъемлемую часть поддержки жизненного цикла продукции на всем его протяжении. Необходимость обеспечения эффективности материальных и виртуальных производств способствовала внедрению аналитических, системных и процессных методов создания продукции.

Состав конкретного изделия, технология его изготовления, методы организации производства, системы менеджмента качества проектируются с использованием методологии управления жизненным циклом наукоемкой продукции и регламентированы ГОСТ Р ИСО 9001 и рекомендуют использование электронных структур изделий (ЭСИ). ЭСИ используют для организации сквозного информационного обмена в рамках интегрированной информационной среды между PDM-системой управления данными об изделии, ERP-системами управления производством, ILS- системой управления эксплуатацией и т.д., в том числе и на уровне первичных и вторичных документов, полученных автоматизированным способом.

Реорганизация производства приводит к необходимости изменения технологической архитектуры, а также интеграции автоматизированных систем с

оборудованием. Однако недостаточная стандартизация в данной области является сдерживающим фактором. В качестве решения проблемы в сфере цифрового производства выступила разработка эталонных архитектурных моделей. Эталонная архитектура определяется как формализованная система принципов, правил и методологических положений, регламентирующих описание физических производственных систем в цифровом пространстве.

Решением проблемы является организация архитектур автоматизированных систем модели цифрового производства с учетом заданного уровня качества. Архитектура автоматизированных систем управления производством должна быть спроектирована таким образом, чтобы поддерживать управление жизненным циклом без структурной и функциональной избыточности. Так же организация взаимодействия с системами на внешнем уровне должна учитывать эргатические подходы для обеспечения точности и быстродействия выполнения операций производственного процесса.

Актуальной является проблема оценки, анализа и оптимизации архитектур автоматизированных систем управления с точки зрения обеспечения отраслевой эффективности производства продукции, информационной безопасности, киберугроз, обработки и защиты данных, защиты интеллектуальной собственности, эргономики и др.

Одной из важных задач при проектировании автоматизированных систем управления машиностроительным производством на концептуальном уровне является вычислительная сложность, обозначающая функцию зависимости объема работы, которая выполняется некоторым алгоритмом, от размера входных данных. Актуальным является сравнительный анализ точных (дискретных, основанных на переборе) и эвристических алгоритмов для поиска оптимального решения.

Построение сложной архитектуры автоматизированной системы управления машиностроительным производством следует рассматривать с точки зрения систем управления (СУ). Для оценки качества в архитектуре должны присутствовать все элементы СУ, которые позволят реализовать основные

процессы. Тогда количественной оценкой качества допустимо использовать величину ошибки, которая описывается с помощью дифференциального уравнения и зависит от большого количества параметров системы.

Для выбора оптимальной архитектуры необходимо применять алгоритмы оптимизации, основанные на объективной оценке системы на всех уровнях. Для принятия решений в режиме реального времени и реконфигурации системы для адаптации под условия конкретного предприятия можно использовать современные подходы для построения системы поддержки.

Степень разработанности темы исследования. Цифровая трансформация является стратегическим процессом преобразования машиностроительного производства. Для определения зрелости предприятий к цифровой трансформации существуют различные инструменты: метод «Структура цифровой зрелости», метод «Оценка цифровой зрелости» на основе разработок MIT, метод «Индикатор цифровой зрелости» от компании Google, авторский метод от S. Barry, S. Assoul, N. Souissi. В России также были созданы свои модели оценки цифровой зрелости. Одной из самых известных считается модель «Организационное цифровое производство», разработанная Московской школой управления Сколково. Новый модуль в рамках Государственной информационной системы промышленности Минпромторг запустил тестирование «Цифрового паспорта промышленного предприятия».

Различные принципы построения эталонных архитектур автоматизированных систем находят отражение в различных международных и российских стандартах: ГОСТ Р ИСО/МЭК 20547, ГОСТ Р 59799-2021, IEC 62890:2020, IEC 62243:2012, ANSI/ISA-95, ISO/IEC 62264 и др. Наиболее известные модели референтных архитектур - это модели референтной архитектуры Industry 4.0 (RAMI 4.0 - Reference architecture model Industrie 4.0) и референтной архитектуры промышленного Интернета (IIRA - Industrial Internet Reference Architecture). Чтобы соответствовать новым требованиям, исследуется несколько новых производственных парадигм: бионическая, генетическая, фрак-

тальная, случайная, виртуальная и холоническая (исследователи в этой области: Боранджиу Т., Бонгаертс Л., Буркхорст А. Ф., Дилигенский Н.В., ДUFFи Н.А., Киттури Р., Моу Дж.И., Пищухина Т.А., Пушкарева М.Б., Скобелев П.О., Шкарупета Е.В.).

Исследования и разработки в области анализа качества автоматизированных систем управления на сегодняшний день ограничиваются выработкой групп критериев. Одни из самых популярных и используемых описаны в работах следующих авторов: ДеЛоне В.Х., Дружинин Г.В., Дубов Ю.А., МакЛин Э.Р., Пальмиус Дж., Травкин С.И., Якимец В.Н. Однако методы расчета множеств критериев, предложенных этими авторами, до сих пор не имеют однозначных и единых подходов и остаются не ясны.

Выбор и обоснование оптимальных решений при проектировании архитектур автоматизированных систем управления и построения логики взаимодействия пользователей с системой является сложной многокритериальной задачей. Исследования в этой области осуществлялись следующими авторами: Батищев Д.И., Галкин В.И., Дубов Ю.А., Кравченко И.Н., Соболев И.М., Статников Р.Б., Травкин С.И., Штойер Р., Якимец В.Н.

С использованием метода комбинаторной оптимизации по Парето можно проводить оптимизацию систем управления. Однако показатели, связанные с эргономикой, индивидуальным восприятием пользователя не учитываются при проектировании автоматизированной системы управления из-за сложности проведения оценки. Эту часть критериев можно анализировать с использованием алгоритмов нечеткого логического вывода. На сегодняшний день использование нечеткой логики развивается следующими учеными: Гринбин М.А., Измуханов Е.А., Кочеганов Д.М., Кульмамиров С.А., Махмадиев Б.С., Маруцак Л. И., Зернов М.М., Штовба С.Д.

Оценка качества алгоритмов, как части архитектуры системы управления производством, является NP-полной задачей. Для ее решения различными авторам предлагается использование метаэвристических алгоритмов (Бранке Дж., Ватутин Э.И., Герати Дж., Гунч М., Дориго М., Дунаев С.В., Канцедаль

С.А., Кажаров А.А., Канцедаль С.А., Костикова М.В., Костюк Ю.Л., Кремер О. Б., Курейчик В.М., Левицкая Л.В., Миддендорф М., Нильссон К., Оуян Дж., Подвальный С.Л., Подшивалов С.Ф., Подшивалова К.С., Разали Н., Семенов С.С., Титов В.С., Угур А., Чмырь Д.А., Шмек Х., Ян Г.Р. и др.)

В области исследования надежности и эффективности производств, в том числе с использованием различных архитектур автоматизированных систем управления машиностроительным производством, можно отметить следующих авторов: Азаров В.Н., Васильев В.А., Омельченко И.Н., Васин С.А., Козловский В.Н., Копейкин А.И., Малафеев С.И., Нечаев Д.Ю., Позднеев Б.М., Северцев Н.А., Труханов В.М., Червяков Л.М., Черкесов Г.Н., Шубинский И.Б.

Объектом исследования являются системы управления производством продукции машиностроения.

Предметом исследования являются алгоритмы и методы организации и оптимизации систем управления для решения многопараметрических задач производства.

Целью научного исследования является разработка методологии организации систем управления машиностроительным производством.

Для реализации данной цели в работе необходимо решить следующие **задачи**:

- исследовать влияние на повышение качества продукции моделей систем управления машиностроительным производством;
- исследовать и обосновать применение метода оценки уровня цифровой зрелости машиностроительного производства с учетом взаимосвязей между моделью жизненного цикла и уровнем цифровизации и автоматизации процессов предприятия;
- выявить универсальные критерии и методы, объединяющие функционально-технологические, производственные параметры и эргатические подходы;

- разработать и обосновать критерии качества систем управления производством и методы их оценки с использованием точных и эвристических алгоритмов, нечеткой логики для решения многопараметрических задач производства;

- разработать методологию организации систем управления производством продукции машиностроения с использованием оптимизированной архитектуры;

- провести апробацию и внедрение результатов работы.

Методы исследования. Использовались методы проектирования с применением унифицированных языков моделирования (UML - Unified Modeling Language) и объектно-ориентированного подхода, математические методы нечеткой логики, методы многокритериальной оптимизации для решения NP-полных задач эвристическими методами программирования, математические методы нормализации данных, методы свертки, корреляционного анализа.

Достоверность научных результатов обеспечивается верификацией математических и информационных моделей с применением системного подхода к проектированию с использованием объектно-ориентированных языков программирования, унифицированных языков моделирования, подтверждаемыми результатами натурных испытаний над системами управления производством, информационно-аналитическими системами, установленных в рамках программно-аппаратных комплексов (серверное, сетевое, компьютерное оборудование, измерительная аппаратура) и экспериментов в среде MATLAB с использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox и Simulink, разработанной аналитической платформы, а также валидацией на основе эмпирических данных.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана методология обеспечения качества продукции и эффективности управления машиностроительным производством на основе организации оптимальной архитектуры автоматизированной системы управления, реализующая комплексную оценку функциональных, технологических и эргономических параметров на внешнем, концептуальном и внутреннем уровнях.

2. Предложена и формализована процедура оценки цифровой зрелости машиностроительного производства на основе модели автоматической оценки уровня информатизации процессов, позволяющая объективно диагностировать текущее состояние информационных активов и выявлять направления их развития для повышения качества и надежности управления производством.

3. Разработана комплексная система оценки эффективности взаимодействия человека с автоматизированной системой управления машиностроительным производством на основе эргатического подхода, нечеткой логики и методов комбинаторной оптимизации, включающая группы критериев, связанных с когнитивными факторами, которые позволяют количественно оценить их влияние на показатели качества и надежности систем.

4. Обоснованы и формализованы критерии и алгоритмы оптимизации параметров архитектуры автоматизированных систем управления машиностроительным производством с использованием методов свертки критериев, анализа иерархий и оптимизации по Парето, обеспечивающие сокращение времени взаимодействия человека с элементами системы управления и снижение количества ошибок при принятии решений в условиях определенности, неопределенности и риска.

5. Разработаны математические модели и автоматизированная платформа для анализа данных о системе управления производством на различных этапах жизненного цикла продукции, реализующие инвентаризацию информационных активов, мониторинг и оценку влияния их использования на качество управления, а также поддержку принятия согласованных и обоснованных решений по выбору оптимальных вариантов использования информационных активов.

6. Получены новые научные знания о закономерностях формирования показателей качества и надежности систем управления машиностроительным производством при организации оптимальной архитектуры автоматизирован-

ных систем, учитывающей влияние функциональных, технологических и эргономических параметров, а также возмущающих воздействий на различных уровнях архитектуры.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке моделей и методов оценки и анализа архитектуры автоматизированных систем управления производством на внешнем, концептуальном и внутреннем уровнях с точки зрения качества, разработке теоретического подхода и обоснования использования аналитических параметров для повышения эффективности управления предприятием.

Практическая значимость работы заключается в развитии методов, обеспечивающих повышение эффективности управления предприятием за счет возможности объективно оценить текущий уровень цифровой зрелости машиностроительного производства, выявить направления развития информационных активов и повысить их качество и надежность.

Применение разработанных методов оценки архитектуры автоматизированных систем управления машиностроительным производством для адаптивной организации процессов позволяет повысить производительность за счет интерактивного анализа данных о работоспособности системы.

Использование предложенных моделей оптимизации параметров архитектуры автоматизированных систем сокращает время взаимодействия человека с различными элементами системы управления производством и снижает количество ошибок.

Предложенная модель автоматизированной платформы для анализа данных с использованием методов свертки критериев и анализа иерархий позволяет принимать согласованные и обоснованные решения по выбору оптимальных вариантов использования информационных активов.

Разработана и реализована автоматизированная платформа, необходимая для эффективного управления жизненным циклом продукции, позволяющая в режиме реального времени анализировать изменения значений параметров архитектуры и принимать соответствующие управленческие решения.

Реализация и внедрение результатов работы.

Основные результаты работы использованы при выполнении проектов по развитию, оптимизации систем управления производствами и модернизации и развития существующих информационных активов промышленных предприятий в ПАО «Газпром Автоматизация» (г. Саратов), АО «Орбита» (г. Воронеж), ООО «Генон» (г. Москва), в том числе:

- системы оценки цифровой готовности машиностроительного производства к трансформации с использованием разработанной модели автоматической оценки уровня информатизации процессов;
- системы автоматической инвентаризации информационных активов, мониторинга и оценки влияния их использования на качество управления производством;
- системы сбора, хранения, консолидации и наглядной визуализации статистических данных для анализа, планирования или моделирования архитектур автоматизированных систем при управлении машиностроительным производством на различных этапах жизненного цикла;
- модуля поддержки принятия решений в условиях определенности, неопределенности и риска для оптимизации архитектуры автоматизированных систем управления машиностроительным производством;
- системы визуализации данных о состоянии и функционировании архитектур систем управления машиностроительным производством.

Разработано и реализовано:

- разработана оценка групп критериев, связанных с когнитивными факторами пользователя при взаимодействии с системой управления машиностроительным производством, методами исследований эргатических функций;
- алгоритмы нечеткого логического вывода с использованием методов комбинаторной оптимизации по Парето для управления качеством автоматизированной системы управления машиностроительным производством;

- автоматизированная система управления машиностроительным производством для комплексной оценки качества алгоритмов, систем и архитектур предприятий и организаций;

- автоматизированная платформа для анализа данных о системе при поддержке принятия управленческих решений на различных этапах жизненного цикла, позволяющая решать задачи инвентаризации информационных активов, изучения динамику надежности системы управления машиностроительным производством.

Результаты исследований по моделям оценки архитектур автоматизированных систем управления машиностроительным производством, используемых при анализе цифровой готовности предприятий и определении качества систем, реализованы на предприятиях и в организациях. Научно-методические разработки, созданные автором, используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 27.03.05 Инноватика, 27.04.07 Наукоемкие технологии и экономика инноваций, 27.04.06 Организация и управление наукоемкими производствами. Внедрение результатов исследования подтверждено соответствующими документами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическое обоснование необходимости разработки методологии организации систем управления машиностроительным производством с помощью оптимальных архитектур автоматизированных систем с учетом особенностей человеко-машинного взаимодействия.

2. Научно обоснованный подход к оценке цифровой зрелости предприятий машиностроения с учетом этапов жизненного цикла и уровня автоматизации процессов для анализа текущей ситуации и определения оптимального пути развития по цифровизации производств.

3. Описание групп критериев автоматизированных систем управления машиностроительным производством, отвечающих за функционально-техно-

логические и эргономические аспекты, а также методов их оценки, основанные на исследовании эргатических функций, автоматическом сборе и анализе данных о динамике изменения состояния системы.

4. Модели и методы применения точных и эвристических алгоритмов, нечеткой логики для оценки качества и надежности архитектуры автоматизированной системы как системы управления машиностроительным производством и оптимизации ее конфигурации.

5. Модель представления системы на внешнем, концептуальном и внутреннем уровнях для оценки качества архитектуры автоматизированной системы предприятий машиностроения, для сбора информации, проведения оценок при определении весовых коэффициентов свертки критериев.

6. Методы определения значений критериев с использованием нечеткой логики и применения методов оптимизации для выявления оптимальной компоновки элементов системы управления машиностроительным производством на концептуальном уровне представления данных.

7. Интерактивный анализ системы поддержки и принятия управленческих решений в виде платформы, как комплексного решения для управления данными о состоянии автоматизированной системы.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертация соответствует пунктам паспорта специальности 2.5.22:

1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства;

6. Методы стандартизации и управления качеством в CALS-технологиях, автоматизированных, цифровых производственных системах;

13. Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов;

21. Развитие теоретических основ и практических приложений организационно-технологической надежности производственных процессов. Оценка уровня надежности, адаптивности и устойчивости производства.

Апробация работы.

Основные результаты исследований были доложены на российских и международных научно-практических конференциях различного уровня, в том числе: International Conference on Integrated Intelligence and Cognitive Engineering (Москва, 2026 г.); 9th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) (Москва, 2025 г.); VII Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых «Наука, технологии и бизнес» (Москва, 2025 г.); III Международной научно-практической конференции «Инновационный вектор развития современной науки» (Петрозаводск, 2024 г.); II Международной научно-практической конференции «Research Forum – 2024» (Петрозаводск, 2024 г.); 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) (Москва, 2023 г.); V Международной научно-технической конференции «Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование» (Москва, 2021 г.); Третьей Международной научно-технической конференции «Управление научно-техническими проектами» (Москва, 2019 г.). Апробация результатов диссертации проводилась на заседаниях НТС в ведущих и профильных по научной специальности учреждениях и организациях: ФГАОУ ВО Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, (Самара, 2026 г.), ФГАОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2025 г.), АО «Орбита» (Воронеж, 2026 г.).

Исследования проводились в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

Часть результатов диссертационного исследования получена при реализации проекта получившего финансирование из средств Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2023-0029).

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 68 публикациях, из них 15 в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий по специальности 2.5.22 «Управление качеством. Стандартизация. Организация производства», 8 статей в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, 2 монографии, 2 патента на изобретение, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, 1 свидетельство о регистрации базы данных, 53 публикации в других изданиях.

Личный вклад автора заключается в обобщении результатов исследований широкого круга авторов по различным направлениям в предметной области, в результате которого обоснованы актуальность темы, цель и задачи, решение которых обеспечивает ее достижение. Также автором получены новые научные результаты, вынесенные на защиту, обеспечено личным участием достижение основных научно-практических результатов внедрения разработок, выраженных в выводах и рекомендациях.

Автором разработаны модели, методы и средства, позволяющие оценивать и проводить анализ качества и надежности архитектур систем управления машиностроительным производством предприятия для повышения эффективности управления, в том числе научно-методические материалы и практические приложения, реализованные в промышленности, которые используются научными организациями и в учебном процессе.

Все научные результаты, изложенные в данной работе, являются личным вкладом автора. Теоретические выкладки и экспериментальные данные получены при непосредственном участии диссертанта. При заимствовании материалов из работ других исследователей в тексте приведены соответствующие ссылки на источники.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения. Содержание диссертации изложено на 387 страницах машинописного текста, содержит 19 таблиц и 85 рисунков. Список литературы включает 310 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

1.1. Построение модели системы управления машиностроительным производством

В современных условиях одной из ключевых задач управления является обеспечение устойчивости предприятия к внешним и внутренним воздействиям, которые носят как стохастический, так и детерминированный характер. Данная цель достигается путем превентивных действий, обеспечивающих готовность организации к данным изменениям. Однако управленческие решения зачастую основываются на интуитивном подходе, при этом математическая формализация поставленной задачи позволяет сделать процесс принятия решений более объективным, повышая качество формируемых стратегий.

Организация систем управления на машиностроительном производстве является актуальной задачей при адаптации к реалиям цифровой трансформации. Управление машиностроительным производством представляет собой организацию процесса для достижения заданной цели. При этом, если система управления функционирует с участием человека, то это автоматизированная система управления (АСУ). Предприятия увеличивают уровень использования информационных технологий в целях повышения эффективности производств и множество используемых на предприятии информационных систем являются частью системы управления.

Однако процесс цифровизации, информатизации, автоматизации проходит без анализа поведения производственной системы с точки зрения разработанных теорий, что приводит к потере устойчивости и накоплению ошибки управления. При этом организация самих АСУ также влияет на качество управления.

Процесс управления состоит из следующих элементов:

1. входные данные, формирующие информацию о задаче управления,

2. устройство обработки данных,
3. исполнительное устройство,
4. объект управления.
5. информация о результатах управления, передающаяся в устройство обработки информации данные для осуществления обратной связи (рисунок 1).

На первом этапе в устройство обработки данных поступает информация о требуемых величинах выбранных показателей, представляющая собой вектор значений функций $d_1(t), \dots, d_n(t)$.



Рисунок 1 – Схема процесса управления

Одновременно с этим в устройство обработки данных поступает информация о текущих значениях функций $x_1(t), \dots, x_n(t)$, описывающих выявленные ранее показатели. В результате чего формируется вектор ошибки управления $e(t)$, представляющий собой разность векторов $d(t)$ и $x(t)$.

На втором этапе полученные на предыдущем шаге данные поступают в исполнительное устройство, которое формирует вектор управляющего воздействия $u(t)$, координатами которого являются значения функций $u_1(t), \dots, u_k(t)$, направленный на оказания влияния на объект управления.

Помимо этого, на объект управления оказывает влияние вектор возмущающих воздействий $f(t)$, координаты которого определяются функциями $f_1(t), \dots, f_m(t)$.

На третьем этапе на формируются новые значения вектора $x(t)$, которые определяются векторами управляющих и возмущающих воздействий, оказываемых на объект управления.

Описанный выше процесс управления повторяется до тех пор, пока не выполнится формула условие:

$$\|e(t)\| = \|d(t) - x(t)\| \rightarrow 0$$

Для каждого из выявленных показателей определяется диапазон допустимых значений. Формально это можно представить в следующем виде:

$$|d_i(t) - x_i(t)| \leq a_i,$$

где a_i — параметр, характеризующий диапазон допустимых значений.

Систему управления по характеру внутренних процессов можно разделить на:

1. Линейную систему, для которой динамика всех звеньев описывается линейными уравнениями.
2. Нелинейную систему, для которой динамика хотя бы одного звена описывается нелинейными уравнениями.

Процесс управления предприятием является нелинейным.

Состоянием (вектором состояния) называют совокупность D величин:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_D),$$

где D — размерность описания.

Величины x_k называются динамическими переменными. Кроме понятия состояния на конечномерном примере (D — конечное число), возможны и бесконечномерные модели, например, когда состояние представляет собой пространственное распределение какой-либо величины, т.е. является произвольной гладкой функцией пространственной координаты.

Оператор эволюции Φ_t позволяет по начальному состоянию $x(t_0)$ определить состояние объекта в любой последующий момент времени

$$t_0 + t: x(t_0 + t) = \Phi_t(x(t_0))$$

Математически он может быть задан уравнениями, отображениями, матрицами, графами и любыми другими способами, обеспечивающими выполнение условия однозначности прогноза.

Ключевым для детерминистического подхода является понятие динамической системы (ДС) [194, 195].

Для задания динамической системы необходимо:

1. определить состояние объекта x ;
2. задать оператор эволюции Φ_t , который позволял бы по начальному состоянию однозначно определять будущие $x(t_0 + t) = \Phi_t(x(t_0))$.

В ходе обработки динамического ряда важнейшей задачей является выявление основной тенденции развития явления (тренда) и сглаживание случайных колебаний. Для решения этой задачи в статистике существуют методы выравнивания.

Целью аналитического выравнивания динамического ряда является определение аналитической или графической зависимости $f(t)$. На практике по имеющемуся временному ряду задают вид и находят параметры функции $f(t)$, а затем анализируют поведение отклонений от тенденции. Функцию $f(t)$ выбирают таким образом, чтобы она давала содержательное объяснение изучаемого процесса.

Для выработки необходимой траектории следует, исходя из специфики или процесса, подобрать определенную совокупность управляющих факторов, воздействующих на этот объект или процесс, так, чтобы ненужные тенденции, пики или спады были нивелированы. Таким образом, воздействие управляющих факторов должно вызывать эффект, равный по величине и противоположный по направлению неугодным тенденциям, т.е. пикам или спадам в прогнозируемом периоде. Пусть мы имеем некоторую матрицу:

$$\begin{bmatrix} Y_{n+1}, Y_{n+2}, \dots, Y_{n+\tau} \\ Y_{n+1}^{opt}, Y_{n+2}^{opt}, \dots, Y_{n+\tau}^{opt} \\ \Delta Y_{n+1}, \Delta Y_{n+2}, \dots, \Delta Y_{n+\tau} \\ \eta_{n+1}^{U,V}, \eta_{n+2}^{U,V}, \dots, \eta_{n+\tau}^{U,V} \end{bmatrix}$$

где Y^{opt} – желаемое или оптимальное значение динамического ряда в конкретном интервале прогнозирования; ΔY – отклонение неуправляемой траектории прогнозирования от оптимальной; $\eta^{U,V}$ – совокупное воздействие управляющих факторов на трендовую U и сезонную V составляющие объекта или процесса, описываемого данным динамическим рядом.

Размерность и значение факторов, обеспечивающих совокупное управляющее воздействие $\eta^{U,V}$, могут быть самыми различными по природе, механизмам взаимодействия и иным показателям.

Качество системы управления представляет собой обобщенную характеристику, отражающую соотношение свойств процесса управления, реализуемого системой, и затрат, необходимых для их достижения. В качестве количественной оценки качества системы управления удобно использовать величину ошибки

$$\delta(t) = g(t) - y(t) = F_x(p)g(t).$$

Однако функцию ошибки $\delta(t)$ для произвольного момента времени определить затруднительно, поскольку она задается дифференциальным уравнением системы высокого порядка и зависит от большого числа ее параметров.

Показатели качества могут определяться либо непосредственно по реакции системы на типовое воздействие — в этом случае их называют прямыми показателями качества, либо косвенно, на основе анализа других параметров системы — тогда они относятся к косвенным показателям качества. Кроме того, качество системы может оцениваться с помощью функционалов, значения которых дают численную интегральную оценку. Такие оценки называются интегральными показателями качества.

Критерии качества управления подразделяются на четыре группы:

1. Критерии точности – основаны на величине ошибки в различных типовых режимах.
2. Критерии запаса устойчивости – характеризуют удаленность системы управления от границы устойчивости.

3. Критерии быстродействия – отражают скорость реакции системы управления на появление задающего и возмущающего воздействий.

4. Интегральные критерии – оценивают обобщенные свойства системы управления, включая точность, запас устойчивости и быстродействие.

Для оценки точности используется величина ошибки в типовых режимах, которые задаются подачей на вход сигналов с нормированными характеристиками.

Переходной режим системы управления характеризуется следующими показателями.

1. Время регулирования определяет быстродействие системы управления и представляет собой интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение выходной величины от установившегося значения становится меньше заданной величины. Обычно принимается допуск $\pm 5\%$ от установившегося значения.

2. Относительное перерегулирование σ по управляющему воздействию определяется как:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\%$$

или, что эквивалентно:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \cdot 100\%$$

В случае, если переходные процессы вызваны возмущением, максимальное отклонение определяется величиной по отношению к установившемуся состоянию:

$$\sigma = \frac{x_1}{x_m} \cdot 100\%$$

Обычно система управления считается удовлетворительной, если $\sigma = \frac{10}{30}\%$. В ряде систем перерегулирование вообще недопустимо.

3. колебаний за время переходного процесса N_x определяется как отношение:

$$N_k = \frac{t_p}{t_k},$$

т.е. количество минимумов в кривой переходного процесса в интервале времени t_p . Как правило, приемлемым значением числа колебаний в системах управления считается $N_k = 1 \dots 3$.

Колебательность связана с расположением корней характеристического уравнения системы и определяется как максимальное отношение мнимой и вещественной частей комплексных корней, то есть, т.е.

$$\mu = \max \left| \frac{\omega_t}{\alpha_1} \right|, i = \overline{1, n}$$

Для ограничения колебательности на плоскости корней задают сектор, определяемый максимальным значением μ .

По показателям реакции системы в переходном режиме можно судить о ее основных характеристиках.

В установившемся режиме, то есть после завершения переходных процессов, качество системы оценивается величиной ошибки — отклонением вынужденного значения выходного сигнала от требуемого:

$$\sigma = \max |y_{max} - y_{уст}| = \max |y_{max} - g(t)|$$

При функционировании системы в условиях случайных воздействий точность оценивается по среднеквадратичной ошибке δ_m . В этом случае сигнал ошибки представляет собой случайный процесс и характеризуется такими параметрами, как среднее значение $\bar{\delta}$, корреляционная функция $R_0(t)$ и дисперсия D_i . Среднее значение $\bar{\delta}$ соответствует статической ошибкой системы.

Среднеквадратичная ошибка определяется как:

$$\delta_{exp} = \sqrt{D_0}$$

Полная ошибка представляет собой сумму среднеквадратичной ошибки случайной и неслучайной составляющих:

$$\delta = \sqrt{\frac{\delta^1}{\delta^2} + \delta_{exp}^2}$$

Можно выделить два основных способа повышения точности управления и быстродействия:

1. Введение интегрирующего звена. Этот способ ориентирован прежде всего на повышение точности управления за счет увеличения порядка астатизма системы.

2. Введение дифференцирующего звена. Подход направлен на улучшение динамических характеристик и повышение быстродействия. Дифференцирующее звено повышает качество системы, формируя управляющее воздействие пропорционально скорости изменения сигнала рассогласования.

Из изложенного следует, что применение интегрирующего и дифференцирующего звеньев позволяет повысить качество управления организацией. В рамках настоящей работы в качестве подхода, обеспечивающего рост быстродействия и точности управления, рассматривается обработка информации о показателях, характеризующих как внешние возмущения, так и внутреннее состояние предприятия.

Вместе с тем практическая реализация данного подхода требует корректного определения параметров, формирующих задачу управления. Поэтому для дальнейшей реализации предложенного решения из множества показателей, задаваемых функциями $x_1(t), \dots, x_n(t)$, выбирается подмножество, характеризующее результаты деятельности предприятия.

Большинство информационных систем на машиностроительном производстве относятся к автоматизированным системам управления. При этом множество АСУ и их конфигурации должны быть оценены. При проектировании и организации таких систем необходимо иметь источник информации о результатах управления, который может быть представлен в виде специальных измерительных модулей и программных подпрограмм. Одновременно требуется анализ информации и выработка решений по оптимальной архитек-

туре системы управления машиностроительным производством. Исполнительными средствами воздействия на объект управления выступают алгоритмы оптимизации и моделирования. Проблемой остается отсутствие методики оценки как задачи управления, так и результатов управления.

Таким образом для обеспечения качества управления и сбалансированной функциональности СУ необходимо разработать методологию оценки и анализа показателей источника информации о задаче и результатах управления, что будет являться элементами системы автоматического управления. Для выбора оптимальной конфигурации СУ машиностроительным производством и выработке решения необходимо разработать алгоритмы оптимизации, подпрограммы и архитектуру системы поддержки принятия решений (СППР).

1.2. Характеристика архитектур систем управления машиностроительным производством

На сегодняшний день актуальной является четвертая промышленная революция. В январе 2011 года немецким правительством был инициирован проект Индустрия 4.0 [249].

Авторы, изучающие четвертую промышленную революцию, отмечают, отличия от трех предыдущих следующими факторами [178, 179, 132, 122, 153]:

- темпами развития, изменения которых нарастают не линейно, а скорее экспоненциально;
- широтой и глубиной, так как инновационные технологии распространяются по различным отраслям промышленности, затрагивают экономику, политику и общество;
- системным воздействием, которое предусматривает целостные внешние и внутренние преобразования всех систем.
- технологии Индустрии 4.0 с 2015 года реализуются с оборотом, растущим на 20% в год. Рост добавленной стоимости, достигнутой с помощью этих технологий, прогнозируется до 425 млрд. евро к 2025 году. Появление новых технологий, таких как Big Data, интернет вещей, облачные вычисления,

роботизация, машинное обучение, искусственный интеллект привело к необходимости цифровой трансформации предприятий, т.е. реорганизации их бизнес-процессов посредством внедрения различных ИТ-инструментов [202, 243, 156].

Большие данные можно охарактеризовать четырьмя составляющими: объем – на сколько много генерируется данных, скорость – как быстро данные генерируются, разновидность – сколько различных типов данных генерируется, точность – насколько достоверны данные [210, 102, 154, 10]. Аналитика больших данных подразделяется на три основных этапа: описательная - предоставление информации в режиме реального времени, прогнозная – вероятность возникновения события, его причины, директивный анализ – поддержка принятия решений [31]. Рост объема данных связан со сложностью управления, информационные системы требуют новых методов разработки программного обеспечения.

Использование цифровых моделей изделия и технологического процесса производства цифровых двойников (Digital Twin of Organization, DTO) позволит с высокой точностью рассчитывать варианты поведения реального объекта под действием различных внешних факторов (как наблюдаемых, так и теоретически возможных), проводить виртуальные эксперименты и выполнять корректировки для достижения целевого результата [273, 100, 73, 128, 124]. Это приобретает особую важность в ситуациях, когда реальный эксперимент может привести к ощутимым финансовым затратам или сопряжен с высокими рисками.

В России актуальной является промышленная автоматизация, поскольку она соединяет машиностроение и информационные технологии. В следствие чего, предприятия увеличивают уровень использования информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) на всех этапах жизненного цикла производственных систем в целях повышения эффективности и снижения себестоимости процессов проектирования и изготовления продукции.

Реорганизация производства при помощи внедрения ИКТ приводит к необходимости изменения технологической архитектуры предприятий, а также интеграции автоматизированных систем с оборудованием.

В качестве решения проблемы недостаточной стандартизации в сфере цифрового производства выступила разработка эталонных архитектурных моделей. Эталонная архитектура определяется как формализованная система принципов, правил и методологических положений, регламентирующих описание производственных систем в цифровом пространстве [245, 143].

В современной практике ведущие промышленно развитые государства разработали национальные эталонные архитектурные решения. К наиболее значимым в международном контексте относятся следующие модели:

- RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0) – эталонная архитектурная модель Индустрии 4.0, разработанная немецкой ассоциацией производителей электротехники и электроники ZVEI [175, 176];
- IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) – эталонная архитектура промышленного интернета вещей, созданная консорциумом Industrial Internet Consortium (IIC), США [185, 265, 170].

На методологической базе RAMI 4.0 в Японии реализована архитектура IVRA (Industrial Value Chain Reference Architecture) – эталонная модель для промышленных цепочек создания стоимости. В Республике Корея разработана архитектура SFRM (Smart Factory Reference Model) – эталонная модель умного производства, адаптированная к требованиям малого и среднего предпринимательства. Национальная инициатива Китая представлена архитектурой IMSA (China Intelligent Manufacturing System Architecture) – эталонной моделью для интеллектуальных производственных систем [29, 232, 225, 247].

С точки зрения информационной безопасности, киберугрозы становятся новым риском [51]. Актуальной является проблема обработки и защиты персональных данных, защита интеллектуальной собственности. Каналы связи должны быть технически совершенными и защищенными от несанкционированного доступа.

Помимо технических аспектов возникают также вопросы взаимодействия человека, общества и новых технологий [8]. В ближайшее время структура занятости существенно изменится, как и требования к квалификации и компетенции сотрудников.

Еще одна задача, от решения которой зависит успех проекта Индустрия 4.0, - вовлечение в процесс малых и средних предприятий. Недостаточность необходимых знаний и навыков, с помощью которых можно адаптировать ИТ-решения к действующим бизнес-моделям, приводит к непониманию, каким образом и с помощью какой именно технологии можно решить ту или иную проблему [277, 52].

Немецкая платформа «Индустрия 4.0» активно сотрудничает с аналогичными альянсами: французским Alliance Industrie du Futur, японским Robot Revolution Initiative, американским Industrial Internet Consortium [55]. Развиваются идеи, как организовать международные испытания для малых и средних предприятий, как развивать и объединять преимущества созданных эталонных архитектур RAMI 4.0 и IIRA [169].

В свою очередь, одной из основных проблем в рамках совместных экосистем является управление совместимостью различных функциональных частей. Стандартизация необходима, когда предприятиям необходимо организовать совместную работу для повышения конкурентоспособности. Например, в рамках сотрудничества Китая и Германии предусмотрена интеграция двух моделей, ориентированная на принципы RAMI 4.0 [148].

Концепция RAMI 4.0

Эталонная архитектурная модель RAMI 4.0 – это модель для систематизации, структурирования и отображения сложных взаимосвязей и функций, является стартовой концепцией информационно-логистической системы (ИЛС), основанной на определенных стандартах для промышленных предприятий. Она объединяет важные элементы Индустрии 4.0 в виде многомерного

куба, отображающего технические объекты (активы) в виде уровней с возможностью описания и прослеживания в течение всего жизненного цикла, с учетом принадлежности их к технической и/или организационной иерархии.

Основная цель RAMI 4.0 заключается в том, чтобы убедиться, что все участники процессов, имеют общую структуру для понимания взаимодействия систем и подсистем. Для этого должны быть разработаны, приняты и интегрированы в системы соответствующие стандарты.

Ведущими международными организациями в области стандартизации являются Международная организация по стандартизации (ИСО, International Organization for Standardization, ISO) и Международная электротехническая комиссия (МЭК, International Electrotechnical Commission, IEC), часть инициатив которых реализуется в рамках совместных технических комитетов (СТК).

Деятельность технических комитетов (ТК) ориентирована на решение следующих приоритетных задач: обеспечение функциональной совместимости производственных систем, гарантирование информационной безопасности, а также развитие и систематизация существующих методологических подходов. В контексте данной повестки организации ISO и IEC сформировали два стратегических координационных органа:

- International Standard (IS) – «Международный стандарт»;
- IEC Systems Committees (IEC/SyC) – «Системный комитет МЭК».

Указанные структуры объединяют представителей всех технических комитетов, осуществляющих деятельность в сферах производства и информационных технологий [38].

В области интеллектуального производства функционирует ряд специализированных технических комитетов, в частности:

- ISO/TC 184 – специализируется на стандартизации данных о продукции, обеспечении совместимости и интеграции, а также разработке архитектурных решений для промышленной автоматизации [226];

- IEC/TC 65 – занимается вопросами управления промышленными процессами, их автоматизации, а также интеграции данных о продуктах и технологических процессах [295].

В контексте RAMI 4.0 есть несколько стандартов, которые были расширены и представляют большую ценность для развития Индустрии 4.0.

МЭК 62264 (IEC 62264) в архитектурной модели RAMI 4.0, представляет собой стандарт для интеграции системы управления производством, основанный на стандарте «Американского национального института стандартов» (American National Standards Institute, ANSI/ISA-95) [228]. ANSI/ISA-95 — это международный стандарт, разработанный «Международным обществом автоматизации» (International Society of Automation, ISA). ISA-95 предоставляет стандарты для разработки автоматизированных интерфейсов между бизнес-системами предприятия и системами управления производством. Платформа ISA-95 используется производителями по всему миру для разработки согласованных моделей данных и терминологии.

Основная цель стандарта – обеспечить бесперебойный поток информации в системах планирования ресурсов предприятия (Enterprise resource planning, ERP), системе управления производством (Manufacturing execution system, MES) и системах диспетчерского управления и сбора данных (Supervisory control and data acquisition, SCADA). ISA-95 поддерживает совместимость во всех отраслях и для любого типа производственного процесса. ISA-95 предлагает концепцию модульных сегментов для определения любой производственной задачи. Где разработчики процессов могут связать несколько сегментов в операцию и выполнять, отслеживать и планировать более сложные задачи. Новые поколения решений и устройств промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT) выходят на рынок и играют все более важную роль в производственных операциях [236]. Ожидается, что эволюция устройств приведет к дальнейшему сглаживанию структуры модели

ISA-95. ISO/IEC 62264 является неотъемлемой частью модели RAMI для развития Индустрии 4.0 и был выбран в качестве ключевого стандарта для фабрики будущих инициатив.

ГОСТ Р МЭК 61512-1-2016 (IEC 61512), который обычно называют ISA-88 (IEC-61512-1), в котором рассматривается управление периодическим процессом с описанием оборудования и процедур [37].

МЭК 62890 (IEC 62890) представляет собой управление жизненным циклом систем и продуктов, используемых для измерения, контроля и автоматизации промышленных процессов [33].

Эталонная архитектурная модель RAMI 4.0 дает предприятиям основу для разработки будущих продуктов и бизнес-моделей. Информационно логистическая система RAMI 4.0 представляет из себя сервис-ориентированную архитектуру (Service-Oriented Architecture, SOA). Эталонная архитектурная модель RAMI 4.0 позволяет ввести элементы и информационно-технологические компоненты жизненного цикла и разделить сложные процессы на управляемые пакеты, включая защиту данных и информационную безопасность.

RAMI 4.0 представляет из себя 3D многоуровневый куб, который состоит из трехмерной системы координат (рисунок 2), описывающей все важнейшие аспекты Индустрии 4.0 [237].

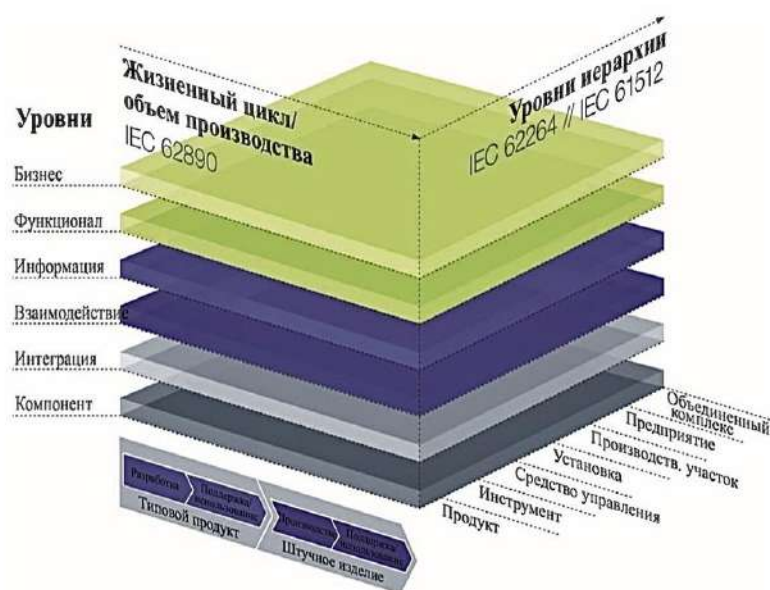


Рисунок 2 – Структура эталонной архитектурной модели RAMI 4.0

Трех-многомерная модель показывает, что производственный объект должен отслеживаться на протяжении всего его жизненного цикла и таким образом, последовательно отображаться от начала и до конца в ИТ-системе от компонентов и оборудования до объединенных в сеть производственных предприятий [113].

Каждый физический и нефизический объект может быть представлен как компонент Индустрии 4.0. Компонент производства может быть расположен внутри обычной производственной иерархии в качестве «управляющего устройства», в том числе программируемого логического контроллера (Programmable Logic Controller, PLC) или роботизированного контроллера (Robotic Controller, RC), или же как система управления (например, ERP-система) [32].

В рамках модели RAMI 4.0 каждый компонент может быть охарактеризован на различных уровнях иерархического взаимодействия. На уровне интеграции, соответствующем описанию физического компонента, определяется его включение в состав программного модуля. Коммуникационный уровень регламентирует взаимодействие интерфейсов, устанавливая правила и протоколы взаимодействия компонента с другими элементами системы. На бизнес-уровне осуществляется многоперспективное описание различных характеристик одного и того же компонента.

Модель RAMI 4.0 также определяет методологию реализации компонентов в виде киберфизических систем посредством так называемых оболочек управления (Administration Shell). Оболочка управления представляет собой программный компонент, обеспечивающий формирование унифицированных интерфейсов взаимодействия физических компонентов с цифровым пространством [130].

Архитектура эталонной модели RAMI 4.0 описывается тремя измерениями: уровни архитектуры; жизненный цикл и поток создания ценности; уровни иерархии. В рамках этих трех осей все важнейшие аспекты Индустрии

4.0 могут быть отображены, что позволяет классифицировать объекты в соответствии с моделью.

Ось «Уровни архитектуры»

Шесть уровней на вертикальной оси описывают разложение объекта на его свойства, структурированные слой за слоем, что позволяет получить виртуальное отображение объекта. Чтобы обеспечить четкое представление и простую обработку архитектурной модели, категории функциональной совместимости объединены в шесть абстрактных уровней функциональной совместимости (рисунок 3).

Уровень активов

На уровне активов (компонентов) акцент делается на физическом распределении всех участвующих компонентов в контексте интеллектуальной сети. Производственное оборудование и пользователи являются его частью.

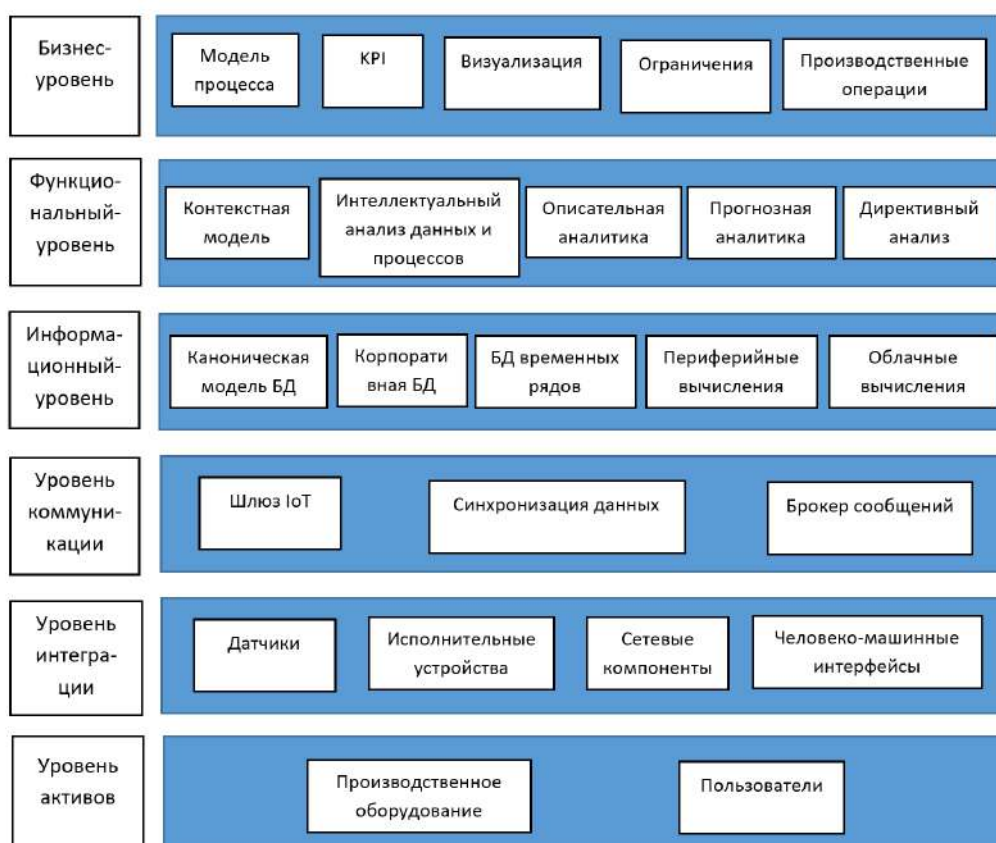


Рисунок 3 - Технологии и функции больших данных для производственных операций в рамках RAMI 4.0 «Уровни архитектуры»

Активы имеют своего цифрового двойника, пользователь также может иметь свою «цифровую копию» в соответствии с концепцией «Цифрового двойника человека» [36].

Уровень интеграции

Этот уровень предоставляет информацию, связанную с активами, в соответствующем формате, соединяя элементы и людей с информационными системами. Административная оболочка представляет из себя виртуальное, цифровое и реальное представление компонента в системе Индустрии 4.0, содержит манифест и диспетчер компонентов. Этот уровень включает в себя датчики и приводы, назначенные машинам, а также корпоративные системы (MES, ERP и т. д.) [121, 127]. Он также включает в себя человеко-машинные интерфейсы, через которые пользователи взаимодействуют с платформой и корпоративными системами.

Уровень коммуникации

Акцент на коммуникационном уровне заключается в описании протоколов и механизмов функционального обмена информацией между компонентами в контексте основного варианта использования, функции или услуги и связанных информационных объектов или моделей данных. Также обеспечивает стандартизированную связь с помощью единого формата данных и обеспечивает поддержку обработки информации между интеграционным и информационным уровнями. Таким образом, данные из различных источников собираются для дальнейшей обработки в информационном уровне.

Информационный уровень

Информационный уровень описывает информацию, которая используется и обменивается между функциями, службами и компонентами. Он содержит информационные объекты и лежащие в их основе канонические модели данных. Информационный уровень включает в себя корпоративную базу данных (БД) для хранения корпоративных данных и БД временных рядов для данных в режиме реального времени, генерируемых датчиками, установленными на оборудовании [107, 276, 101].

Таким образом, необходимые данные извлекаются и объединяются соответствующим образом, чтобы быть доступными для функционального уровня.

Функциональный уровень

Этот слой позволяет формально описывать функции и создает платформу для горизонтальной интеграции различных функций. Включает в себя среду выполнения и моделирования для служб, поддерживающих бизнес-процессы, и среду выполнения для приложений и технических функций. Чтобы обеспечить масштабируемость, эффективность и функциональные возможности разрабатываются веб-сервисы архитектур Stupid Oracle Acronym (SOA) или Event Driven Architecture (EDA) [191, 216, 281]. SOA – это архитектура, которая позволяет предприятиям раздробить монолитные приложения на меньшие компоненты или сервисы, которые могут быть использованы для обеспечения или изменения функциональности. EDA – это архитектура, в которой события инициируют обмен сообщениями в реальном времени между независимыми приложениями. То есть архитектура SOA позволяет автоматизировать и модернизировать бизнес-процессы, которые охватывает несколько подразделений и приложений, а EDA позволяет отслеживать и реагировать на определенные события или проблемы в бизнесе, когда они появляются. Интеграция этих двух архитектур представляет из себя сервис-ориентированную архитектуру Event-Driven SOA [266].

На функциональном уровне описываются логические функции актива, включая технические и функциональные аспекты его работы в экосистеме Индустрия 4.0. Этот уровень обеспечивает: формализованное цифровое представление функций; горизонтальную интеграцию разнородных функций на единой платформе; возможность выполнения и моделирования сервисов, а также бизнес-процессов; среду для запуска приложений и реализации технической функциональности.

В зависимости от того, насколько полны данные на информационном уровне, функциональный уровень поддерживает следующие возможности: построение контекстных моделей; проведение интеллектуального анализа данных и процессов; описательную аналитику; прогнозное моделирование; директивный анализ для формирования рекомендаций. Контекстная модель включает в себя определение элементов производственной системы, включая активы, формирует основу для работы алгоритмов анализа данных.

Интеллектуальный анализ процессов извлекает данные из архивной документации событий, хранящейся в информационных системах, с целью мониторинга и улучшения процессов [238, 115, 114]. Это облегчает структурирование и анализ показателей производственных бизнес-процессов и ключевых показателей эффективности корпоративных.

В контексте потоковой обработки описательная аналитика имеет дело с (глубокими) методами машинного обучения и алгоритмами обнаружения аномалий [231]. В предлагаемой архитектуре описательная аналитика реализована в виде алгоритмов реального времени на основе генерируемых датчиками потоков данных с целью выявления аномального поведения.

Прогнозная аналитика выполняется как в автономном режиме, так и в режиме реального времени. Директивный анализ запускается прогнозами в реальном времени о будущих ситуациях с целью выработки рекомендаций по проактивным действиям и их оптимальному времени и формулирования плана действий [279, 125].

Бизнес-уровень

Бизнес-уровень представляет собой бизнес-представление об обмене информацией, связанном с производственными процессами, обеспечивает целостность функций в потоке создания ценности и позволяет отображать бизнес-модели и результаты всего процесса [230]. Бизнес-уровень обеспечивает интеграцию и функциональную совместимость предприятия, предоставляя интерфейсы с остальными бизнес-функциями. Он учитывает ограничения,

правила и политики, которые влияют на работу системы и облегчают взаимодействие производственных операций с общей бизнес-средой. Для этого он предоставляет модель процесса в соответствии с бизнес-моделями и ключевыми показателями эффективности (Key Performance Indicators, KPI), определенными на стратегическом уровне, а также с учетом юридических и бизнес-ограничений.

Организационные и правовые условия: общие организационные рамки (ввод в эксплуатацию, условия заказа, нормативные требования); правовые и регуляторные положения; правила моделирования для системы Индустрия 4.0.

Финансовые аспекты: ценообразование; доступность ресурсов; система скидок и иные финансовые условия.

Функциональная интеграция: обеспечение согласованности функций в цепочке создания добавленной стоимости; взаимосвязи между различными бизнес-процессами; соответствие бизнес-моделей, формируемых в ходе бизнес-процессов.

Инструментальная поддержка: набор сервисов функционального уровня; механизмы получения результатов для перехода бизнес-процесса на следующую стадию.

Каждый уровень сам по себе изображается с использованием плоскости Индустрия 4.0, которая определяется следующим образом: приложение, основанное на киберфизических системах, различает точки зрения электрического процесса и точки зрения управления информацией.

Ось «Процесс потока создания ценности»

Левая горизонтальная ось представляет собой жизненный цикл установок и продуктов на основе МЭК 62890 «Управление жизненным циклом систем и продуктов, используемых в измерении, управлении и автоматизации промышленных процессов». Используется для описания актива в определенный момент времени в течение его жизненного цикла (ЖЦ) от производства до его утилизации.

Каждый объект имеет свой жизненный цикл и процессы, определенной длительности, которая основана на временной шкале. Объект содержит продукт, физические объекты (машины, двигатели, запасные части, аппаратную систему, компоненты, инструменты, файлы) и виртуальные составляющие (документы, папки, записи файлов, данные, планы проектов и программное обеспечение операционной системы). Актив характеризуется своим состоянием в конкретное время в конкретном месте по данной оси. В информационном мире актив представлен на основе следующей концепции (рисунок 4).

Таким образом актив: представлен или изготовлен определенным образом; имеет определенное состояние в течение жизненного цикла; имеет коммуникационные возможности; представляется при помощи информации (данных); имеет техническую функциональность.

В RAMI 4.0 вышеуказанные критерии необходимо поддерживать, обновлять и сохранять для повышения производительности. Влияние уровня процесса на уровень архитектуры определено в таблице 1.

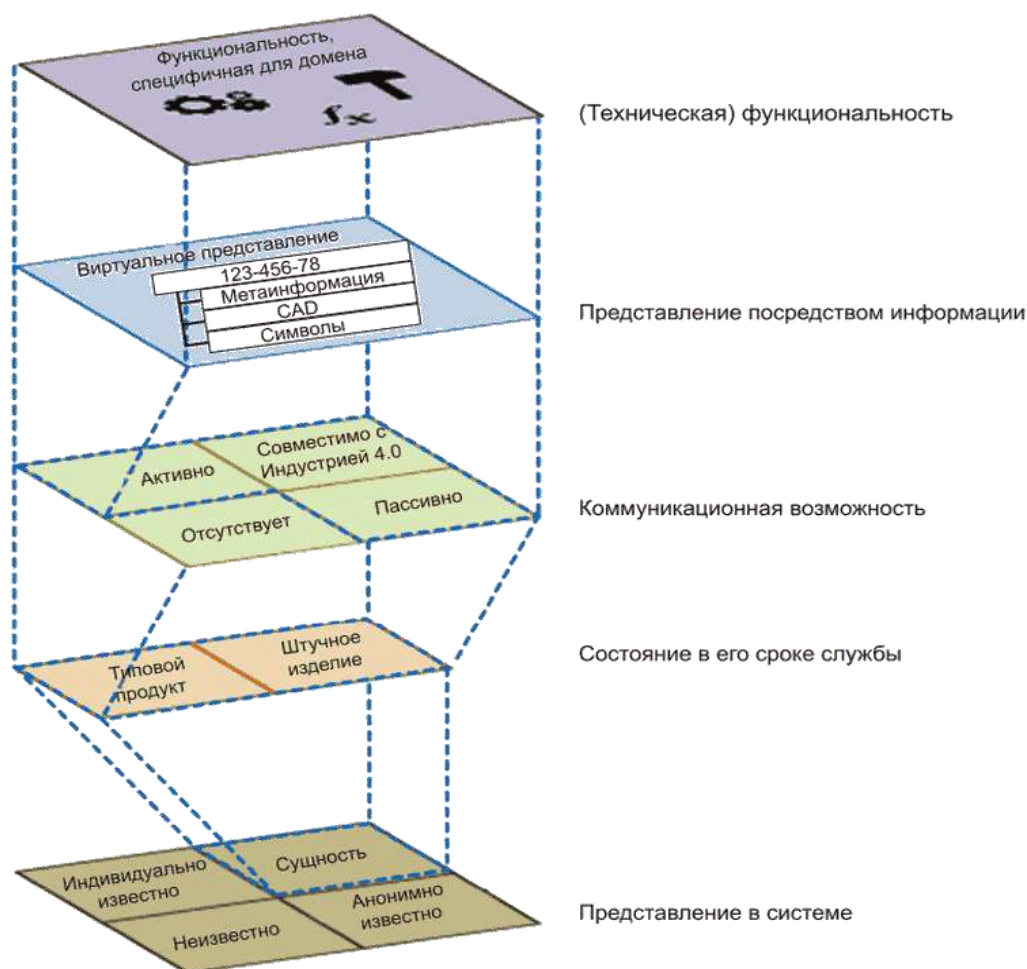


Рисунок 4 - Концепция актива RAMI 4.0

Уровень процесса имеет две основные фазы: типовой продукт и экземпляр. Если продукт находится в состоянии разработки, то его называют «Типовой продукт». Как только он переходит в производство, он становится «Экземпляром». Всякий раз, когда продукт переделывается или к нему добавляется новая функция, его состояние снова превращается в «Типовой продукт». Экземпляр – идентифицируемый актив, характеризующийся свойствами типового продукта (рисунок 5).

Таблица 1 - Жизненный цикл в RAMI 4.0

Фаза	Жизненный цикл	Этапы ЖЗ	Описание
Типовой продукт	Разработка	Конструирование	Это первая идея продукта. На этом этапе отображается каждый аспект продукта, от ввода в эксплуатацию до разработки, тестирования и создания первых прототипов.
		Компьютерное моделирование	
		Прототип	
Типовой продукт	Применение/ Обслуживание	Программные обновления	Представляя результат этапа разработки, он показывает первую модель или прототип машины или продукта.
		Инструкция по эксплуатации	
		Циклы технического обслуживания	
Экземпляр	Производство	Продукт	После указания требований и создания типа
		Данные	

Фаза	Жизненный цикл	Этапы ЖЗ	Описание
		Серийный номер	все продукты разрабатываются по этому шаблону. Этот этап представляет собой разработку отдельной детали, прежде чем она станет уникальной.
Экземпляр	Применение/ Обслуживание	Техническое обслуживание	Представление конечного продукта. Чтобы удовлетворить потребности этого этапа, деталь должна быть уникальной и используемой.
		Переработка	
		Утилизация	

Ось «Уровни иерархии»

На правой горизонтальной оси расположены уровни иерархии из IEC 62264, серии международных стандартов для корпоративных ИТ-систем и систем управления производством. Эти уровни иерархии представляют различные функциональные возможности на заводах или объектах, которые регулируются стандартом IEC 62243 основанном на ANSI/ISA-95 [229]. Ось иерархии основана на модели эталонной архитектуры для фабрики по ПОСТ Р МЭК 62264-1 и ГОСТ Р МЭК 61512-1.

Чтобы представить среду Индустрии 4.0, функциональные возможности необходимо было расширить, следующие уровни иерархии были изменены и дополнены (рисунок 6):

1. «Объединение предприятий» описывает отношения между активом или комбинацией активов и другой актив или комбинацию активов, например, сеть заводов;
2. «Инструмент» добавлено как иерархический уровень;
3. «Продукт» обозначает взаимодействующий продукт, который изготовлен как часть процесса добавленной стоимости Индустрии 4.0.

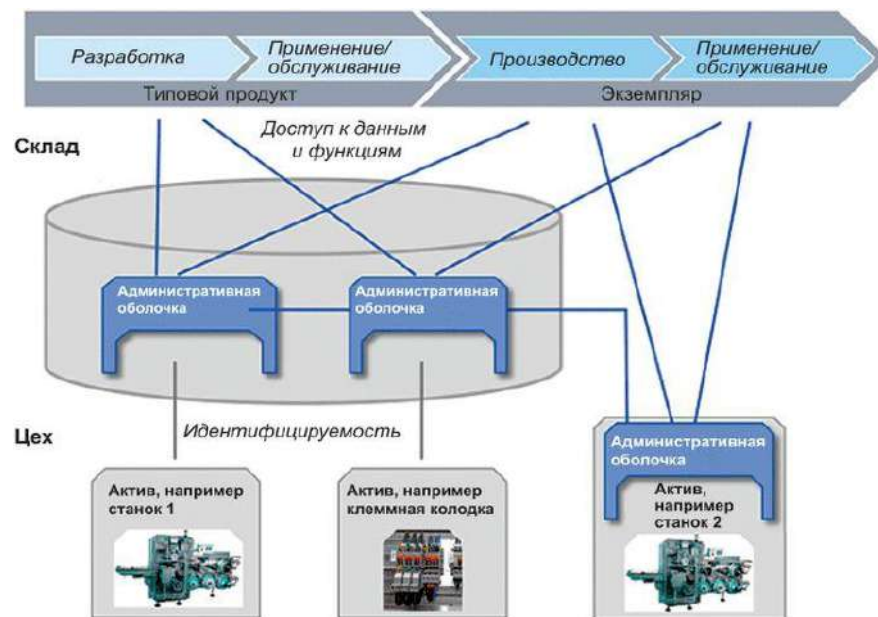


Рисунок 5 – Административная оболочка компонентов Индустрия 4.0

Категории уровней иерархии:

Продукт: любое изделие.

Инструмент (исполнительные механизмы): в основном, это электронные устройства, используемые для обнаружения и идентификации компонентов и сенсорной технологии.

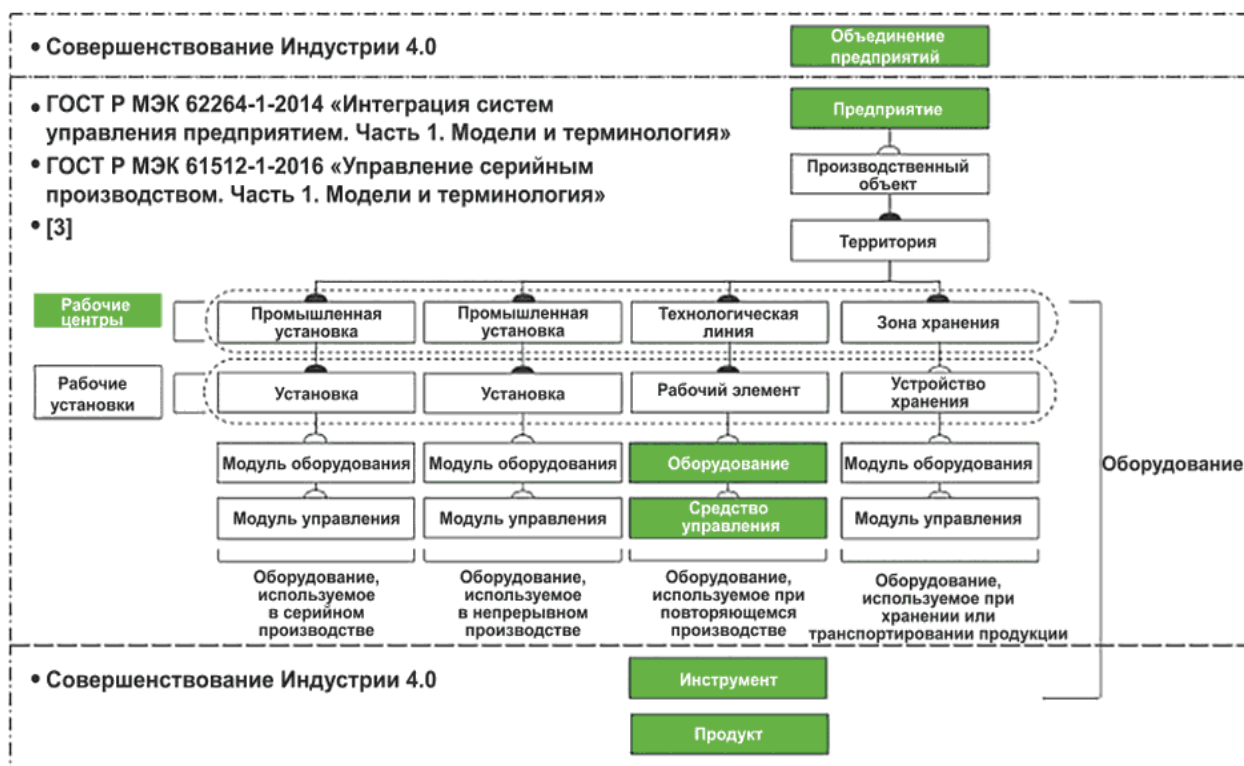


Рисунок 6 – Ось «Уровни иерархии»

Средство управления в виде машин/датчиков, используемых для управления командами ввода/вывода, например, программируемый логический контроллер, распределенная система управления, графический интерфейс.

Оборудование: операторы выполняют административные действия для проверки работы событий и процессов в системе SCADA.

Рабочий центр: хранит производственную информацию, определяет состояние производства и контролирует его.

Предприятие: обычно определяется в терминах ERP, называемое программным обеспечением для управления предприятием.

Объединение предприятий: как правило, это высшая категория всех уровней и в основном взаимосвязана с заинтересованными сторонами, поставщиками, клиентами и поставщиками услуг. Хранит информацию о продажах продуктов, маркетинговой стратегии, статистике.

Таким образом, умное производство позволяет получить всю информацию о производственном процессе: автоматизированные системы собирают информацию о всех компонентах производственного процесса, таких как материалы, оборудование, машины, роботизированные процессы и т.д., а также

о связанных с компонентами операциях для управления этими средами. От производства до разработки продукта процессы взаимосвязаны в виде цепочки, а эталонная архитектурная модель позволяет описать эту структуру [116, 129, 278, 118, 117]. Преимущество RAMI 4.0 в том, что модель объединяет различные точки зрения пользователей и обеспечивает общий способ видения технологий Индустрии 4.0. Модель направлена на совместную работу различных организаций, преодолевая разделения национальных органов по стандартизации.

Концепция IIRA

Интернет вещей (Internet of Things, IoT) представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития информационно-коммуникационных технологий, поскольку обладает потенциалом повышения темпов внедрения инноваций, а также роста эффективности и качества функционирования различных систем. Разработка программного обеспечения для IoT осложняется необходимостью интеграции мобильных приложений, устройств и сервисов в единую информационную среду. Применение специализированных программных интерфейсов и методов ускоренной разработки при одновременном обеспечении требований надежности предполагает использование особых подходов к проектированию конфигураций IoT. В данной связи референтные архитектуры могут рассматриваться в качестве одного из ключевых средств преодоления указанных ограничений [264, 285].

Существенным этапом в становлении IoT стало внедрение протокола IPv6, который создал необходимые технические предпосылки для его дальнейшего развития. В настоящее время его распространение стимулируется как коммерческим интересом, так и разработкой референтных архитектур для отдельных предметных областей.

Следует отметить, что стандарт Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) выходит за рамки IoT, поскольку включает рекомендации, относящиеся также к производственным и логистическим процессам. В свою оче-

редь, Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) в большей степени ориентирован на промышленное применение. Проект IoT-A, напротив, наиболее полно охватывает ИТ-аспекты IoT. В области межмашинного взаимодействия также реализуются крупные инициативы, основанные на эффективных, масштабируемых и защищенных технологических стеках. Как правило, такие стандарты базируются на классической модели OSI и задают спецификации для канального, сетевого, транспортного и прикладного уровней.

К числу основных требований, отражаемых в архитектурных моделях IoT, относятся следующие положения:

- механизмы установления соединения и обмена данными должны обеспечивать как взаимодействие по схеме «точка-точка», так и распространение информации между множеством узлов, в том числе посредством многоадресной и широковещательной передачи;
- системы управления устройствами должны обеспечивать обработку подключения новых объектов и изменений их конфигурации, а также распространение соответствующих изменений;
- необходимы механизмы сбора, анализа и передачи данных, обеспечивающие извлечение информации, требуемой для предоставления сервисов;
- в условиях роста объемов данных возрастает значимость требований к масштабируемости систем;
- для всех компонентов IoT должны быть предусмотрены механизмы безопасности, доверенной связи и обеспечения приватности.

Референтная архитектура IoT должна учитывать указанные требования и дополнять их необходимыми функциями, информационными структурами и механизмами. Референтные модели, в свою очередь, описывают состав элементов системы и характер их взаимодействия.

На сегодняшний день наиболее известными архитектурами IoT являются IoT-A и IIRA. Первая из них разработана более детально и продолжает развиваться, тогда как вторая находится на стадии обсуждения и уточнения.

IoT-A ориентирована преимущественно на семантические аспекты и обеспечивает возможность интерпретации данных в рамках технико-экономических обоснований. При этом она сосредоточена на общих концепциях информатики, не акцентируя внимание на прикладной семантике. IIRA, напротив, в большей степени ориентирована на отраслевые применения и охватывает четыре ключевых домена: бизнес, операции (прогнозирование, мониторинг, оптимизация и др.), информацию (данные и аналитика) и приложения (пользовательский интерфейс, интерфейсы программирования, правила и логика). Спецификация RAMI 4.0, ориентированная на производственную сферу, расширяет IIRA, дополняя функциональный уровень двумя концепциями, закрепленными в стандартах IEC 62890, 62264 и 61512, а именно жизненным циклом и потоком создания ценности.

В рамках IoT-A достаточно полно представлены вопросы моделирования и структурирования управления бизнес-процессами на основе IoT, виртуальных объектов, сервисов IoT и кросс-сервисной организации с точки зрения функциональности, информации и областей применения. Аналогичным образом агентные программы и код, исполняемый на устройствах в прикладных сценариях, зависят от конкретной реализации. В IIRA данные вопросы также рассматриваются, однако основное внимание уделяется технико-экономическим обоснованиям и сценариям применения.

Обе архитектуры лишь кратко затрагивают вопросы межмашинного взаимодействия, указывая, в частности, на возможность реализации сетевого уровня на основе IPv6, а также сетевого и транспортного уровней с использованием UDP и CoAP (Constrained Application Protocol). В качестве более легкой альтернативы HTTP может применяться MQTT, функционирующий поверх TCP/IP.

На рисунке 7 представлены архитектурные уровни и протоколы в соответствии с актуальными версиями стандартов.

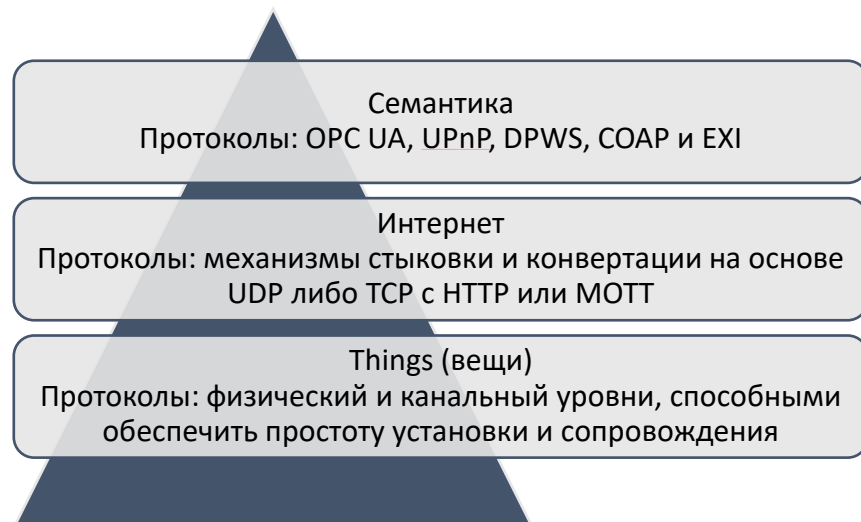


Рисунок 7 - Уровни архитектуры и протоколы Интернета вещей

Для ряда сценариев применения IoT могут использоваться существующие стандарты для программируемых логических контроллеров, предусматривающие циклический или событийный запуск задач.

Кроме того, стандарты, регламентирующие человеко-машинный интерфейс и обработку больших данных, в настоящее время развиты недостаточно. Первым шагом к их стандартизации может стать разработка семантических описаний для устройств, параметров и пользовательских интерфейсов.

Эталонная архитектура IIRA представляет собой открытую архитектуру для построения промышленного интернета вещей (ПИВ). Она задает высокоуровневую абстрактную модель и предлагает универсальные архитектурные шаблоны, обеспечивающие широкое применение промышленных интернет-приложений в различных отраслях. При адаптации к реальным сценариям использования эта архитектура трансформируется в конкретные детализированные решения, учитывающие особенности предметной области. Таким образом, применение эталонной архитектуры охватывает все этапы жизненного цикла системы – от концептуализации, сбора требований и проектирования до модернизации и вывода из эксплуатации [241, 208].

Основным элементом IIRA являются представления.

1. Бизнес-представление определяет цели построения системы ПИВ на основе стратегических ориентиров предприятия.

2. Пользовательское представление задает требования к использованию системы. В ходе его разработки формируется контекстная модель, описывающая систему, ее элементы, внешнюю среду и взаимосвязи между ними.
3. Функциональное представление описывает функции ПИВ, их структуру и взаимосвязи как внутри системы, так и с внешними элементами. В его рамках формируются концептуальные диаграммы и текстовые описания взаимодействия модулей.
4. Представление внедрения рассматривает технологии, необходимые для реализации функциональных элементов, организации связи между ними и обеспечения их жизненного цикла. При этом все элементы соотносятся с задачами системы и бизнес-целями.

Еще одним существенным аспектом IIRA является взаимосвязь всех элементов с моделью жизненного цикла системы. Жизненный цикл в IIRA определяется с учетом специфики конкретной отрасли. Такой подход позволяет выделять значимые области системы на различных этапах ее развития и заранее формировать решения, обеспечивающие устойчивое функционирование.

IIRA представляет собой основанную на стандартах открытую архитектуру для систем промышленного интернета вещей (IIoT). Архитектурные представления IIRA формируются на основе анализа вариантов использования IIoT, идентификации заинтересованных сторон и корректного определения их потребностей и интересов. В модели IIRA выделяются четыре представления: бизнес-представление, пользовательское, функциональное и представление внедрения. Бизнес-представление позволяет определить заинтересованные стороны, их бизнес-видение, ценности и цели в контексте создания системы IIoT. Пользовательское представление описывает предполагаемые сценарии использования системы. Функциональное представление сосредоточено на компонентах системы IIoT, их структуре, взаимосвязях и взаимодействии между собой, а также на связях системы с внешними элементами среды, необходимых для обеспечения ее функционирования.



Рисунок 8 - Модель архитектуры IIRA

Референтная архитектура IIRA основывается на высокоабстрактной общей структуре и задает универсальные архитектурные шаблоны, обеспечивающие широкое применение промышленных интернет-приложений в различных отраслях. При адаптации к реальным сценариям использования эта структура преобразуется в детализированные архитектуры, учитывающие специфику конкретных задач промышленного интернета.

Эталонная модель корпоративной архитектуры PERA

Предприятия, внедряющие в свою практику технологии четвертой промышленной революции, сталкиваются с необходимостью оперативного управления информацией с применением бизнес-архитектур, которые адаптированы под требования Индустрии 4.0. Однако на многих предприятиях до сих пор используются такие бизнес-архитектуры как PERA, GERAM и CIMOSA.

Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA) – это эталонная модель корпоративной архитектуры, разработанная Теодором Дж. Уильямсом и членами отраслевого Консорциума Университета Пердью по компьютерному интегрированному производству в 1990-х годах [244, 293, 294, 283].

Среди основных характеристик стоит отметить ориентацию на жизненный цикл, составляющих архитектуру, и рассмотрение взаимодействия интер-

фейсов, технологией и человеческим фактором в рамках методологии для организации правильного обмена информацией и интеграции предприятия по вертикали и горизонтали. Данные характеристики и определяют PERA как модель архитектуры и методологии в рамках киберфизической концепции.

В методологическом аспекте архитектура PERA устанавливает систему областей, фаз и уровней, на которые могут быть декомпозированы субъекты, формирующие предприятие в рамках всего жизненного цикла. При этом учитывается, что каждый элемент системы интегрирует три ключевых компонента: производственное оборудование, человеческие ресурсы и системы управления информацией.

В процессе проектирования и внедрения объектов в рамках методологии PERA выделяются три самостоятельные сущности, соответствующие производственной системе: архитектура производственной системы; система управления организационной структурой; система управления информацией.

Эволюция модели PERA в части трех производственных сущностей отражает переход от иерархической архитектуры системы управления, ориентированной на производственное оборудование, к распределенной интеллектуальной архитектуре киберфизических систем, обеспечивающей возможности подключения в реальном времени для осуществления мониторинга и управления в облачном режиме.

Уровни интеграции предприятия по модели PERA показывают модель управления производством на 5 уровнях:

Уровень 0 – системы инженерного проектирования, которые определяют фактические физические процессы с помощью датчиков, исполнительных механизмов и других устройств производственного процесса и выполняют функции автоматики и промышленной системы управления для измерения переменных параметров машин и управления выходами технологического процесса. При этом устройства взаимодействуют друг с другом, с оператором и с устройствами управления верхнего уровня.

Уровень 1 – интеллектуальные устройства и системы, которые фиксируют и анализируют физические процессы при помощи датчиков, исполнительных механизмов и сопутствующих приборов. На этом уровне используются программируемые контроллеры, которые управляют производственным процессом.

Уровень 2 – системы для мониторинга, контроля и управления физическими процессами при помощи программного обеспечения для контроля и сбора данных (SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition) в режиме реального времени и человеко-машинных интерфейсов (HMI). На этом уровне контроль за временем выполнения процессов и эксплуатацией производственного объекта осуществляется с помощью HMI, систем оповещения, систем управления пакетной обработкой и управления рабочими станциями.

Уровень 3 – системы, которые осуществляют управление производственным потоком: системы управления операциями; системы управления производством/операциями (MES / MOMS); системы управления лабораториями, техническим обслуживанием и производительностью предприятия; система управления базами данных временных рядов (TSDB) - для оптимизации, хранения и обработки временных рядов, связанных пар времени (смены, часы, минуты, секунды) и значений; промежуточное ПО.

Уровень 4 – системы бизнес-логистики и управления производственной деятельностью, связанной с бизнесом. ERP является основной системой, которая устанавливает производственный график, уровни использования материалов, отгрузки и запасов.

Уровень 5 – на этом уровне находятся службы управления бизнес-ресурсами предприятия через ERP, CRM, PLM системы, а также BIM для объекта.

Для корпоративной интеграции основными группами стандартов являются: 770-Control Systems (770-Системы управления), 780-Industrial Computing (780-Промышленные вычисления), включая MES, 790-Industrial Telecom (790-Промышленные телекоммуникации) [218]. PERA также опирается на ряд стандартов корпоративной интеграции:

1. APICS (American Production and Inventory Control Society - Американское общество управления производством и запасами), которая является «некоммерческой» организацией, обслуживающей промышленность и предлагающей учебные и справочные материалы по управлению цепочками поставок и операциями. APICS предлагает множество справочников по ERP, SCM (Supply Chain Management, Управление цепочками поставок), JIT (Just- in-time System, Система «точно в срок»), управлению качеством производства.

2. CEN (Comité Européen de Normalisation- Европейский комитет по стандартизации). Группа станжратов по системной архитектуре CEN/TC310/WG1 разработанная для концептуализации и моделирования производственных процессов и их ресурсов, созданных для обеспечения поддержки принятия решений на основе моделей бизнес-процессов. TC310 в первую очередь ориентирован на дискретное производство. Работа CEN координируется с ISO TC184/SC5/WG1 в рамках «Венского соглашения».

3. KBSi (Knowledge Based Systems Inc. - Системы, основанные на знаниях), основанные Национальным институтом стандартов и технологий (NIST), который выпустил IDEF в качестве стандарта функционального моделирования.

4. IEC (International Electrotechnical Commission - Международная электротехническая комиссия) занимается стандартизацией в области электрических, электронных и смежных технологий. Некоторые из стандартов МЭК разрабатываются совместно с Международной организацией по стандартизации (ISO). МЭК способствовала развитию и распространению стандартов для единиц измерения. Также МЭК предложила систему стандартов, которая, в конечном счете, вошла в систему единиц СИ.

5. ISA (International Society of Automation - Международное общество автоматизации) некоммерческая профессиональная ассоциация инженеров, техников и менеджеров, занимающихся промышленной автоматиза-

цией. Являясь всемирно признанным поставщиком базовых технических ресурсов, основанных на стандартах для профессии, ISA стремится сделать мир лучше с помощью автоматизации.

6. ISO (International Standards Organization - Международная организация по стандартизации, занимающаяся выпуском стандартов). Сфера деятельности ИСО касается стандартизации во всех областях, кроме электротехники и электроники, относящихся к компетенции IEC. Некоторые виды работ выполняются совместными усилиями этих организаций. Кроме стандартизации, ИСО занимается проблемами сертификации.

7. MESA (Manufacturing Execution Systems Association - Ассоциация систем управления производством). MESA - ведущая мировая организация по промышленным ИТ-системам выше систем управления и ниже корпоративных ИТ, включая управление техническим обслуживанием, планирование производства и другие системы MES на объекте. MESA разрабатывает стандарты и управляет большим набором проектов разработки.

8. MIMOSA (Machinery Information Management Open Systems Alliance - Альянс открытых систем управления информацией о машинах). MIMOSA — это некоммерческая отраслевая ассоциация, деятельность которой направлена на создание решений, использующих независимые от поставщиков открытые стандарты, для создания совместимой промышленной экосистемы для готовых коммерческих решений.

9. NAMUR - это организация пользователей автоматизации в перерабатывающих отраслях.

10. OAG (Open Applications Group - Группа открытых приложений) - это некоммерческий консорциум, занимающийся передовым опытом и XML-контентом на основе процессов для электронного бизнеса и интеграции приложений. Проекты OAG включают: контентная работа, определяющая бизнес-процессы, их сообщения и словарь данных; техническая работа, включающая проектирование XML, разработку, работу с репозиторием UML и архитектуру приложения.

11. OMG (Object Management Group - Группа управления объектами) - является международным некоммерческим консорциумом по стандартам компьютерной индустрии с открытым членством, целью которого является установление стандартов программного обеспечения, не зависящих от поставщиков, и обеспечение функциональной совместимости в масштабах всего предприятия.

12. PIP (Process Industry Practices - Практика перерабатывающей промышленности) предоставляет стандарты, которые «гармонизированы» со стандартами инженерных предприятий по нескольким дисциплинам, включая контроль процесса и схемы трубопроводов.

13. STEP (STandard for Exchange of Product Data) - стандарт для обмена данными о продуктах, который получил широкое международное признание, однако в обрабатывающей промышленности он в значительной степени вытеснен ISO. STEP признан на всех уровнях корпоративной архитектуры для обмена информацией между приложениями. Он также является основой для многих связанных стандартов, включая BPMN (Business Process Model and Notation, нотация и модель бизнес-процессов) и B2MML (Business-to-Manufacturing Markup Language - язык разметки связи между бизнесом и производством).

Модель жизненного цикла PERA демонстрирует интеграцию систем планирования деятельности, типа ERP, систем инженерного проектирования, типа CAD/CAM/CAE, и систем управления машиностроительным производством на этапах от разработки концепции до утилизации, и также эта модель определяет степень автоматизации производства и процессов. Модель PERA показывает изменение роли человека по мере повышения уровня автоматизации в любом из компонентов.

Компьютерно-интегрированная архитектура открытых систем производства (CIMOSA, GERAM)

Проект CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture) был разработан в 1992 специально для производственных систем. Основной целью CIMOSA является процессно-ориентированное моделирование производственных предприятий и обеспечение поддержки выполнения операций на основе этих моделей [218, 239, 261].

Первоначальная цель CIMOSA заключалась в том, чтобы разработать архитектуру открытой системы и определить набор концепций и правил для облегчения построения будущих архитектур. Одной из основных идей CIMOSA является классификация производственных операций на общие функции каждого предприятия, не зависящие от организационной структуры или сферы деятельности и специфические для отдельных предприятий.

Разработка CIMOSA в конечном итоге привела к двум ключевым моментам: среда моделирования, которая поддерживает все этапы жизненного цикла, включая определение требований, описание реализации и выполнения повседневной работы предприятия; интегрированная инфраструктура, которая предоставляет информационные технологии для выполнения конкретной модели реализации, независимая от поставщика и легко переносимая под условия предприятия.

Кроме того, структура предлагает подход к моделированию, основанный на событиях и процессах, с целью охватить основные аспекты предприятия в одной интегрированной модели. Основными аспектами являются функциональный, поведенческий, ресурсный, информационный и организационный аспекты.

CIMOSA может применяться для моделирования и анализа технологических процессов. Стандартизированные модели CIMOSA также могут использоваться в режиме реального времени на производственном предприятии для планирования, диспетчеризации, мониторинга и предоставления информации о процессах. Одним из стандартов, основанных на CIMOSA, является Обобщенная эталонная архитектура и методология предприятия GERAM (Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology).

GERAM – это структура предприятия, которая определяет набор компонентов для использования при проектировании предприятия [183, 253].

Эта структура была разработана совместной целевой группой Международной федерации автоматического управления (IFAC - International Federation of Automatic Control) и Международной федерации обработки информации (IFIP – International Federation of Information Processing) по корпоративным архитектурам для интеграции предприятий.

Одной из основ GERAM является то, что моделирование предприятия рассматривалось как основная проблема проектирования и интеграции. Она содержала восемь строительных блоков, в которых были реализованы методологии и соответствующие языки, такие как:

1. Общая эталонная архитектура предприятия (GERA - Generic Enterprise Reference Architecture), которая определяет общие концепции предприятия, рекомендуемые для использования в проектах интеграции предприятия. Эти концепции включают жизненный цикл корпоративных систем, моделирование бизнес-процессов, языки моделирования для разных пользователей архитектуры (бизнес-пользователи, проектировщики систем, специалисты по ИТ-моделированию и др.), интегрированное представление модели в различных представлениях.

2. Общие методологии проектирования предприятия (GEEM - Generic Enterprise Engineering Methodologies), которые описывают общие процессы интеграции предприятия в терминах моделей процессов с подробными инструкциями для каждого шага.

3. Общие языки моделирования предприятия (GEML - Generic Enterprise Modeling Languages), которые определяют общие конструкции для моделирования предприятия, адаптированных к различным потребностям людей, создающих и использующих модели предприятия.

4. Универсальные инструменты моделирования предприятия (GEMT - Generic Enterprise Modeling Tools), которые определяют общую реализацию

методологий интеграции предприятия и языков моделирования, а также другой поддержки для создания и использования моделей предприятия.

5. Модели предприятия (ЕМ - Enterprise Models), представляющие собой моделирование работы предприятия с использованием общих языковых конструкций моделирования.

6. Онтологические теории (ОТ - Ontological Theories), которые формализуют наиболее общие аспекты концепций, связанных с предприятием, с точки зрения основных свойств и аксиом.

7. Общие модели предприятия (GEM - Generic Enterprise Models), определяющие эталонные модели, которые охватывают концепции, общие для многих предприятий для повышения эффективности процесса моделирования.

8. Универсальные модули (GM - Generic Modules), определяющие общеприменимые составляющие, которые будут использоваться при интеграции предприятия.

Результирующая модель предприятия может представлять как всю деятельность предприятия, так и ее часть, и позволяет моделировать альтернативы и вести их оценку. GERAM предоставляет общее описание всех элементов, рекомендуемых для проектирования и интеграции предприятия.

GERAM моделирует всю историю жизненного цикла проекта интеграции предприятия, начиная с его первоначальной концепции в глазах предпринимателей, которые первоначально разрабатывали его, через его определение, функциональный дизайн или спецификацию, детальный проект, физическая реализация или строительство и, наконец, эксплуатация и утилизация. Модель позволяет указывать инструменты, используемые исследователями или практиками на каждом из этапов.

Концепция холонической системы

Рыночный спрос и давление со стороны окружающей среды и общества требуют, чтобы эффективные производственные системы адаптировались и подстраивались под постоянно изменяющиеся внешние условия. Данный факт создает потребность в новых системах управления производством, способных

эффективно управлять изменениями и сбоями в производственных процессах. Чтобы соответствовать требованиям, исследуется несколько производственных парадигм: бионическая [92], генетическая [98], фрактальная [160], случайная [45], виртуальная [40] и холоническая [134] производственные системы.

Холоническая производственная система – это модель производства, которая заключается в создании самоорганизующихся автономных элементов – холонов. Такая система, среди прочего, позволяет повышать гибкость и эффективность производства, что, в свою очередь, снижает затраты на производство и улучшает качество готовой продукции.

Ключевым принципом холонических производственных систем является создание автономных элементов – холонов, которые являются самоорганизующимися сущностями и могут быть организованы и перераспределены таким образом, чтобы удовлетворять требованиям клиентов.

Идея холонов была предложена Артуром Кестлером более 30 лет назад [186]. Данная идея основывается на том, что сложные системы эволюционируют из простых систем через промежуточные формы - подсистемы. Холон описывает гибридную природу подсистем в системе, являясь одновременно самодостаточными цельными элементами по отношению к частям, составляющим холон, и зависимыми элементами по отношению к системе.

Холоническая производственная система (Holonetic manufacturing system, HMS) – это высоко децентрализованная производственная система, состоящая из автономных и сотрудничающих агентов, называемых холонами, которая соблюдает гибкие правила управления, образуя так называемую холархию [289]. Холархия обеспечивает гибкость в условиях неопределенности, а также эффективное использование ресурсов.

Основные понятия концепции HMS:

- Холон – автономный блок производственной системы для преобразования, транспортировки, хранения и/или проверки достоверности информации и физических объектов. Холон состоит из информационных и физических процессов, при этом холон может быть частью другого холона.

- Автономия – способность организации создавать свои собственные планы и стратегии и контролировать их выполнение.
- Сотрудничество – процесс, посредством которого группа разрабатывает планы и выполняет эти планы.
- Холархия – система холонов, которые могут сотрудничать для достижения определенной цели. Холархия определяет основные правила сотрудничества холонов и тем самым ограничивает их автономию.

В холархии холоны могут создавать сотрудничающие группы и могут входить в эти группы и выходить из них при необходимости. Кроме холархии, выделяют также иерархический и гетерархический подходы (рисунок 9) [194].

Иерархия описывает совокупность объектов в порядке ранжирования. Иерархия содержит направленную структуру командования и реагирования между подразделениями на всех уровнях. Древовидная структура с одним самым верхним элементом называется моноиерархией, в то время как структура, содержащая элементы ациклического графа, называется полииерархией.

Напротив, системы гетерархии организованы на горизонтальном уровне. Каждая сущность может сотрудничать со всеми окружающими сущностями без руководства или разрешения вышестоящей сущности, т.е. подсистемы автономны и обмениваются информацией друг с другом.

Выделяют 3 основных типа холонов: продуктовые холоны, ресурсные холоны и холоны заказов. Каждый из них относится к определенному аспекту производства, будь то логистика, планирование ресурсов или технологическое планирование производства.

Эталонной структурой для HMS является PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture), элементы которой соответствуют 3 основным типам холонов (рисунок 10).

Продуктовые холоны обладают знаниями о технологическом процессе и продукте и выступают в качестве информационного сервера для других холонов. Продуктовый холон содержит последовательную и актуальную информа-

цию о жизненном цикле продукта, требованиях к продукту, дизайне, технологических планах, спецификации материалов, способах и методах обеспечения качества и т.д. Он отвечает на запрос о модели продукта или его характеристиках ресурсному холону и холону заказов.

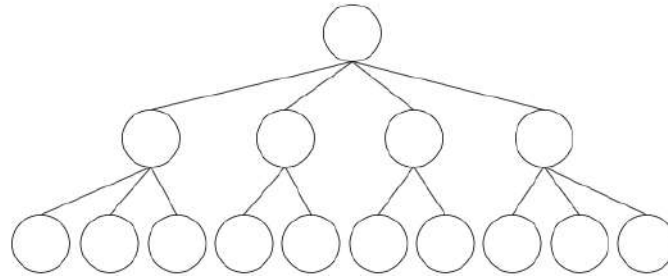
Ресурсные холоны, соответствующие физическим производственным ресурсам (станкам, рабочей силе, транспортным средствам, сырью, энергии, производственным площадям и т.д.), обладают знаниями о процессе и способах и методах его выполнения. Ресурсные холоны, получая задание от холона заказов, определяют размер партии и распределяют, организуют и контролируют производственные ресурсы.

Холоны заказов, представляющие собой задачи в производственной системе, обладают знаниями о продукте и способах и методах выполнения процессов. Они контролируют логистические аспекты производства в той же степени, что и кооперацию с другими холонами заказов или с ресурсными холонами, чтобы задача, которой они соответствуют, была выполнена правильно и в срок. Каждая задача определяется стандартной продолжительностью, самой ранней датой начала и самой поздней датой завершения. Холон заказа может представлять собой заказы клиентов, заказы на изготовление на складе, заказы на изготовление прототипов, заказы на обслуживание и ремонт ресурсов и т.д.

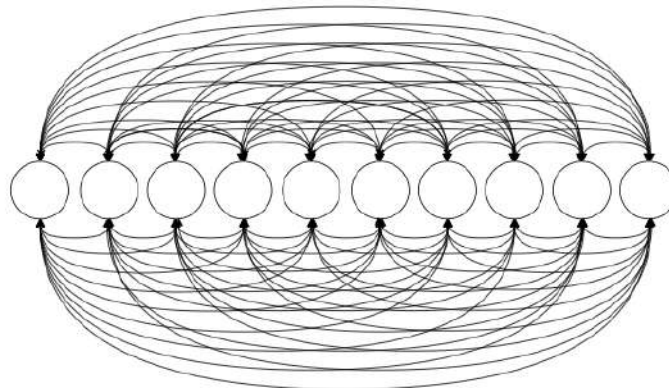
Структуру PROSA можно также представить в виде диаграммы классов в нотации UML (рисунок 11).



Иерархия



Гетерархия



Холархия

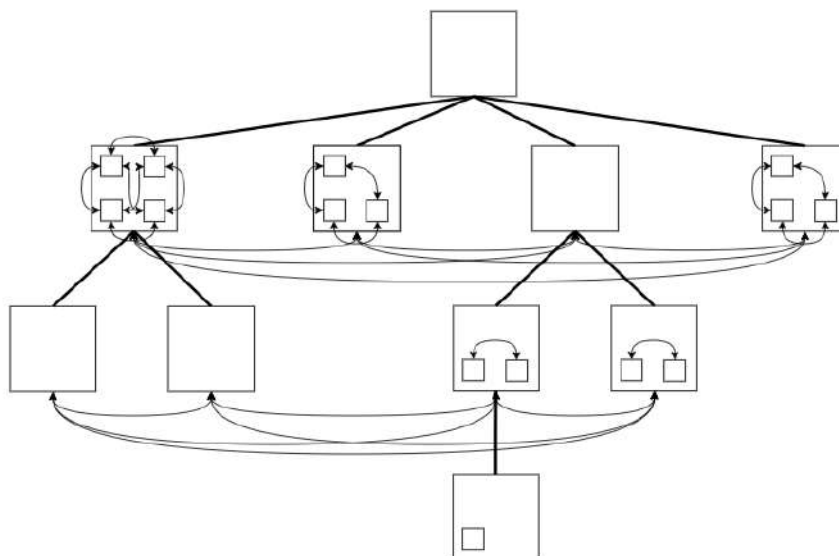


Рисунок 9 - Иллюстрация иерархического, гетерархического и холархического подходов

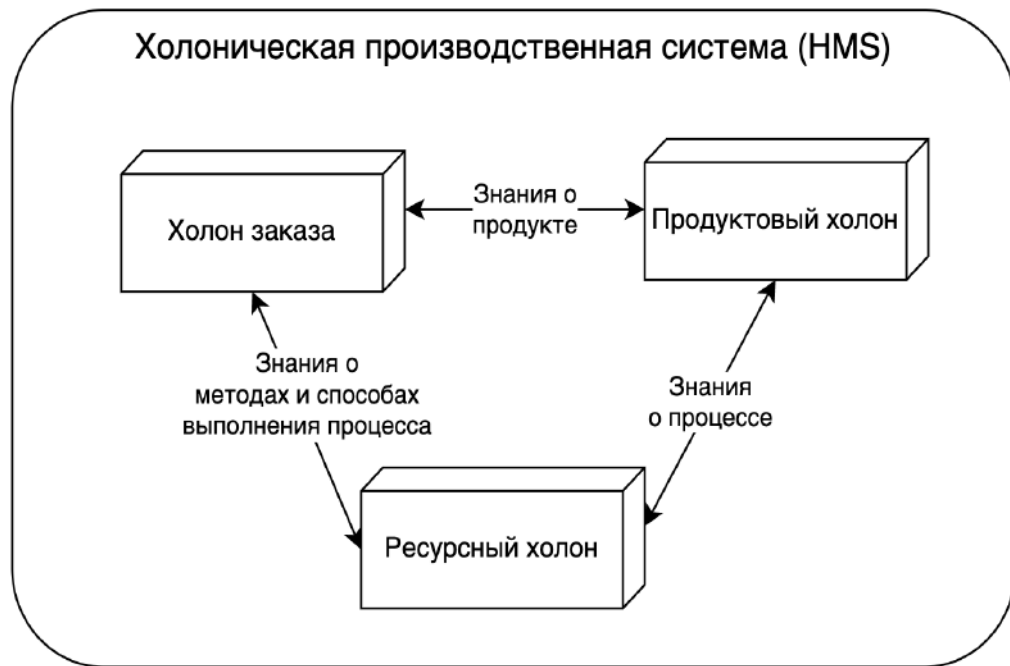


Рисунок 10 - Структура холархической производственной системы

Нотация UML позволяет отразить типы связей между элементами:

- HMS включает в себя в качестве составных частей холон заказов, производственный и ресурсный холоны - на диаграмме это изображено в виде стрелки с пустым ромбом на конце (отношение агрегации);
- Холон заказов, производственный и ресурсный холоны связаны между собой соответствующими знаниями, которыми они обладают (отношение ассоциации);
- HMS включает в себя как минимум один (или более) продуктовый холон, как минимум один (или более) ресурсный холон и любое количество холонов заказов (может и не содержать ни одного холона заказа, тогда HMS будет работать “вхолостую”);
- Холон заказов может относиться к одному и более ресурсному холону, равно как и продуктовый холон. В то же время холон заказов относится ровно к одному продуктовому холону. Это связано с тем, что если в заказе будет разрешено обрабатывать несколько продуктов одновременно, между этими продуктами могут возникнуть технологические ограничения.

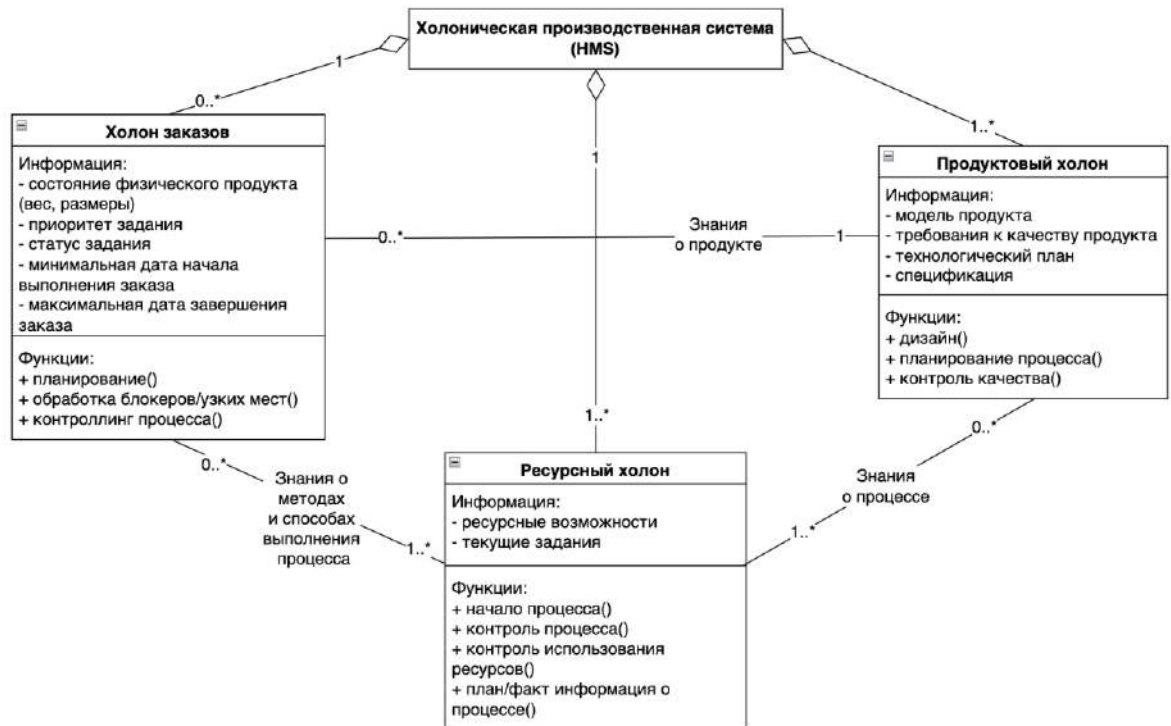


Рисунок 11 - UML-диаграмма HMS

Допущения ограничивают применимость и ограничивают эволюцию систем управления производством в условиях динамически изменяющейся внешней среды. В [209] подробно описана эволюция от централизованного подхода к гетерархическому через иерархический и модифицированный иерархический подход.

Естественное восприятие иерархии в структуре сложных систем является мотивацией к созданию иерархических систем управления производством. Все иерархические архитектуры управления требуют фиксированной структуры во время работы системы и предполагают детерминированное поведение компонентов. Эти факторы лежат в основе основных недостатков иерархических архитектур [214, 215]:

- Изменение структуры, например, для добавления, модификации или удаления ресурсов, является сложной задачей. Во-первых, для этого требуется выключение всей системы. Во-вторых, все структуры данных на более высоких уровнях нуждаются в обновлении, чтобы можно было точно прогнозировать поведение системы на более низких уровнях.

- Внесение непредвиденных изменений, таких как новые структуры данных или, например, новый технологический план с альтернативами или новой технологией, практически невозможно.
- Прогнозирование на более высоких уровнях используется для запуска ресурсов. Сбои, такие как поломки оборудования, сводят на нет планирование и, следовательно, распространяются на более высокие уровни. В некоторых случаях расписание уже недействительно до того, как оно будет полностью сгенерировано.
- Иерархические системы управления почти автоматически подразумевают нисходящую методологию разработки, что снова накладывает дополнительные ограничения.

В [227] вводится концепция кооперативных гетерархий в качестве альтернативы догматическим иерархическим структурам управления. Гетерархические системы управления производством имеют плоскую структуру и состоят из независимых сущностей, называемых агентами. Эти агенты, как правило, представляют ресурсы и решают задачи, а также обладают локальными данными для адаптации к изменяющимся внешним условиям.

«Протокол контрактной сети» является наиболее известным примером такого переговорного механизма [280]. Он состоит из пяти этапов: объявление задания менеджером, оценка задания потенциальными подрядчиками, прием в работу или отказ подрядчиками от задания, передача менеджером задания одному из подрядчиков одному из подрядчиков, кооперация менеджера и подрядчиков для выполнения поставленной задачи. Это дает простую и отказоустойчивую систему, поскольку ни одному из агентов не требуется априорная информация о других агентах. Когда ресурс работает со сбоями, он просто не участвует в процессе; когда ресурс способен выполнять новые операции, связанный агент начинает отвечать на заявки на выполнение таких заданий; новые ресурсы требуют только создания дополнительного агента и т.д.

Основная аксиома этой парадигмы управления порождает ее принципиальные недостатки, которые препятствуют широкому использованию такого

рода систем управления в промышленных условиях. Независимость агентов запрещает использование глобальной информации. Следовательно, централизованное планирование и расходование ресурсов невозможно:

- Производительность глобальной системы, например, пропускная способность, очень чувствительна к определению и тонкой настройке параметров, например, к времени транспортировки.
- Система управления не может гарантировать минимальный уровень производительности в случае, если система выходит за рамки рабочей области, для которой были настроены правила. Когда система находится в пределах своего номинального рабочего диапазона, можно предсказать только среднюю общую производительность.
- Предсказать поведение отдельных заказов невозможно. Время обработки заказа сильно зависит от характера и статуса других заказов в системе.

Холонический подход к управлению производством основан на использовании 3 базовых холонов - холона продукта, ресурсного холона и холона заказа, - чьи функции в разной степени присутствуют в иерархическом и гетерархическом подходах.

3 базовых холона обеспечивают необходимую функциональность производственной системы, что служит основным преимуществом холонического подхода к управлению производственной системой.

Функциональность холона продукта, то есть генерация информации о технологическом процессе, рассматривается как автономное начальное действие. Однако в случае возникновения каких-либо неполадок, таких как поломка станка или отсутствие инструмента, техническая перенастройка процесса может быть более эффективной, чем логистическая перестройка.

Четкое разделение между холоном заказа и холоном ресурсов является более общим, чем объединение этих двух обязанностей в одном объекте, как это делается в нескольких гетерархических системах. В более продвинутых рыночных механизмах есть как агенты заказа или детали, так и агенты ресур-

сов; сценарии, в которых используются только агенты ресурсов, неявно содержат одного агента ресурсов, ответственного за готовую деталь. В последнем случае ресурсный агент играет как роль исполнителя задачи, так и роль диспетчера задач. Поскольку обе роли независимы, лучше всего разделить их.

3 базовых холона охватывают все важнейшие производственные функции, присутствующие в иерархической системе управления: планирование операций, контроль уровня запасов, координация машин для выполнения операций, планирование технического обслуживания, мониторинг, разработка процедур контроля, планирование технологических процессов, дизайн продукта, контроль качества.

Примерами производственных применений структуры PROSA, где используется HMS и показал свое потенциальное преимущество, являются:

1. использование HMS для обработки потоков деталей для ткацких станков при термообработке и обработке поверхностей [272];
2. исследовательский проект ESPRIT MASCADA [193], который использует систему аварийного управления производством на основе агентов, имитирующих поведение в колониях насекомых; этот проект внедрялся в трех различных производственных областях: производство автомобилей, сборка электроники и производство стали [260];
3. применение PROSA для открытой добычи полезных ископаемых, строительства дорог, лесозаготовки [288];
4. применение эталонной архитектуры PROSA для координации нескольких мобильных роботов [263];
5. применение холонической архитектуры (HCA) в сфере автоматизации производства [248];
6. применение HCA в управлении информационными потоками в газопроводных системах и электросетях [242];
7. Применение HMS при управлении непрерывными процессами производства радиофармпрепаратов [187].

Архитектура HMS типа PROSA состоит из трех базовых типов холонов: холонов ресурсов, холонов продуктов и холонов заказов. Каждый базовый тип ориентирован на различные функции производственной системы. Холоны обмениваются знаниями о процессах, знаниями о производстве и знаниями об исполнении процессов соответственно. Описательная модель данных, функций и поведения холонов показывает более подробные аспекты архитектуры.

После сравнения PROSA с существующими подходами к управлению производством был сделан вывод, что PROSA охватывает все аспекты как иерархической, так и гетерархической архитектуры управления. Таким образом, PROSA можно рассматривать как обобщение двух предыдущих подходов. Что еще более важно, это также приносит значительные инновации: структура системы отделена от алгоритма управления, логистические аспекты могут быть отделены от технических, а PROSA позволяет внедрять более продвинутые алгоритмы гибридного управления.

1.3. Взаимосвязь электронных структур изделий и системой управления машиностроительным производством

Основной характеристикой сложной принципиально новой наукоемкой продукции является: стабильные качество и надежность, соответствующие мировому уровню; минимизация используемых ресурсов при относительно низкой себестоимости; учет требований каждого потребителя; компонентное построение продукции расширенного рыночного применения; большое количество используемых конфигураций; полная отработка на технологичность; предпочтительно крупносерийный и массовый тип производства.

В машиностроении, согласно ЕСКД, вместо термина «продукция» используются термин «изделие». Активно осваивается производство сложно структурированных изделий. Следует отличать понятия продукция и экземпляр продукции. Экземпляр продукции есть единичный представитель продукции, имеющий код исполнения соответственно действующему на момент выпуска заказу и комплекту технической документации, серийный номер и дату выпуска.

Под конфигурацией следует понимать структуру изделия, находящегося на любой стадии: от планируемой разработки до существующего продукта. Данная структура характеризуется набором эксплуатационных, функциональных и физических свойств, которые удовлетворяют предъявляемым требованиям. Информация о конфигурации фиксируется в различных информационных моделях, соответствующих этапам жизненного цикла изделия.

В машиностроительной отрасли для описания номенклатуры продукции применяется геометрическая топология объекта. Она представлена структурными графами и включает пространственные характеристики, а также параметры точности отдельных элементов.

Компоненты продукции рыночного типа проектируются с расчетом на длительное применение не только в текущем изделии, но и в других продуктах. Основой для таких компонентов служат готовые коммерческие решения технического и программного характера (Commercial Off-The-Shelf, COTS).

Достаточно близким подходом является агрегатное, и блочное построение продукции. Определяющее место при компонентном (модульном) построении продукции играет стандартизация и унификация, выполняемые на международном уровне. В настоящее время получили распространение стандарты открытых систем, когда стандартизируются протоколы взаимодействия, топология объекта и интерфейсы. В этом случае физические принципы построения компонента продукции и их техническая реализация не имеют существенного значения [282].

Таким образом, компонент продукции должен быть стандартизован в рамках предприятия или в рамках международной стандартизации. Построение новейшей сложно структурированной продукции на основе готовых освоенных компонентов во много раз экономически выгоднее. Одновременно сокращаются риски, уменьшаются производственные циклы.

В условиях рыночной конкуренции при необходимости учета требований каждого потребителя производство любого продукта стало персонифицированным. Как следствие такого индивидуального подхода, число конфигураций

одного вида изделий, выпускаемого на одном предприятии, может составлять несколько тысяч. Современные методы управления конфигурацией заключаются в целенаправленном проведении и поддержке изменений в структуре и характеристиках (конфигурации) процесса или продукции после создания документально закреплённой официальной базовой версии.

Управление конфигурацией продукции на протяжении их полного жизненного цикла является одним из основных принципов производства и составляет особую значимую задачу обеспечения качества. Конфигурационный менеджмент основывается на применении комплексов электронных структур изделия (ЭСИ), имеющих весьма сложное и многоуровневое представление. Данное направление методов создания и производства продукции должно получить опережающее научное развитие и промышленное внедрение.

Единство информационного описания изделий и процессов обеспечивается использованием электронной структурой изделия (ЭСИ). В РФ внедрены стандарты ГОСТ 2.051-2013, ГОСТ 2.052-2015, ГОСТ 2.053-2013, ГОСТ 2.054-2013 и пр., которые соединяют в единое целое отечественную методологию создания изделий «Единую систему конструкторской документации» и основополагающую систему стандартов CALS/ИПИ- технологий ГОСТ Р ИСО 10303. Согласно ГОСТ 2.053-2013 ЭСИ является конструкторским документом, содержащим состав сборочной единицы, комплекса или комплекта и иерархические отношения (связи) между его составными частями и другие данные в зависимости от назначения.

ЭСИ используют для организации сквозного информационного обмена в рамках интегрированной среды между PDM-системой управления данными об изделии, ERP-системами управления производством, ILS- системой управления эксплуатацией и т.д., в том числе и на уровне первичных и вторичных документов, полученных автоматизированным способом из ЭСИ. Такие документы могут быть созданы в CAD-системе, поддерживающей протоколы применения, согласно ГОСТ Р ИСО 10303-203-2003 и файлы, сформированные по этому стандарту. Соответствующие информационные объекты должны быть

снабжены реквизитами. Затем они могут быть переданы в смежные системы управления (PDM, ERP и др.).

ЭСИ является наиболее общим документом, консолидирующим данные об изделии для организации информационного взаимодействия между специализированными системами CALS-технологий. Она используется для представления информации о составе изделия и иерархии его построения; интегрирования разнотипной информации о характеристиках изделия и его составных частей; указания вариантов модификаций изделия, применяемости и взаимозаменяемости составных частей; формирования обозначений изделия на основе классификационных характеристик. Состав и способы представления технических данных в ЭСИ определяются назначением ЭСИ, стадией жизненного цикла и моделью данных. С использованием ЭСИ разработчиком на основе общей базы данных на изделие могут быть сформированы вторичные документы по ГОСТ 2.102-2013.

В технической практике используются следующие основные ЭСИ: функциональная, конструктивная, производственно-технологическая, физическая, эксплуатационная и совмещенная.

Различные варианты структуры изделия регистрируются соответствующими изменениями в ЭСИ в зависимости от содержания стадий и этапов жизненного цикла с использованием контекстов. Контекст учитывает стадии и этапы проектирования, особенности использования изделия в тех или иных условиях. В обозначении информационного объекта контекста указывается область, которую он охватывает.

Машинно-ориентированное представление данных о продукции и обмен этими данными на протяжении всего жизненного цикла позволяет осуществлять обмен инвариантными файлами, создавать коллективные базы данных о продукции (изделиях), архивировать соответствующие сведения и модели. Часть стандартов серии ГОСТ Р ИСО 10303 относится, в частности, к методам описания интегрированных (родовых) ресурсов, используемых для описания

изделия; управления информацией об изделии; информационной поддержки структур интегрированных ресурсов.

При этом на сегодняшний день информация об изделии из коллективных баз данных на этапах жизненного цикла передается в различные системы автоматизации. Автоматизированные системы представляют, хранят и обрабатывают информацию об изделии и процессах с помощью вычислительной техники. Описание предметной области в виде архитектуры на внешнем, концептуальной и внутреннем уровне в соответствии с описанием элементов хранимых данных обеспечивает разделение и независимость работы в реальном времени с целью достижения высокопроизводительных и надежных характеристик автоматизированных систем управления жизненным циклом продукцией (рисунок 12).

1.4. Структурное представление взаимосвязи показателей качества продукции и систем управления машиностроительным производством

Под качеством согласно последней редакции международного стандарта ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» [34] понимают степень соответствия совокупности присущих характеристик (свойства, имеющиеся в чем-то, а не присвоенные (в отличие от цены)) требованиям (потребности или ожидания, которые установлены, обычно предполагаются или являются обязательными).

Предлагается использовать следующую номенклатуру основных групп показателей качества продукции по характеризующим ими свойствам:

1. показатели назначения;
2. показатели надежности;
3. показатели эргономичности;
4. показатели эстетические;
5. показатели технологичности;
6. показатели транспортабельности;
7. показатели стандартизации и унификации;
8. показатели патентно-правовые;

9. показатели экологические;
10. показатели безопасности;
11. показатели экономические.

Показатели назначения определяют важнейшие функциональные свойства изделий: производительность, максимальная и минимальная скорость, мощность, маневренность, проходимость, чувствительность, содержание полезного вещества, содержание вредных примесей, температура воздуха.

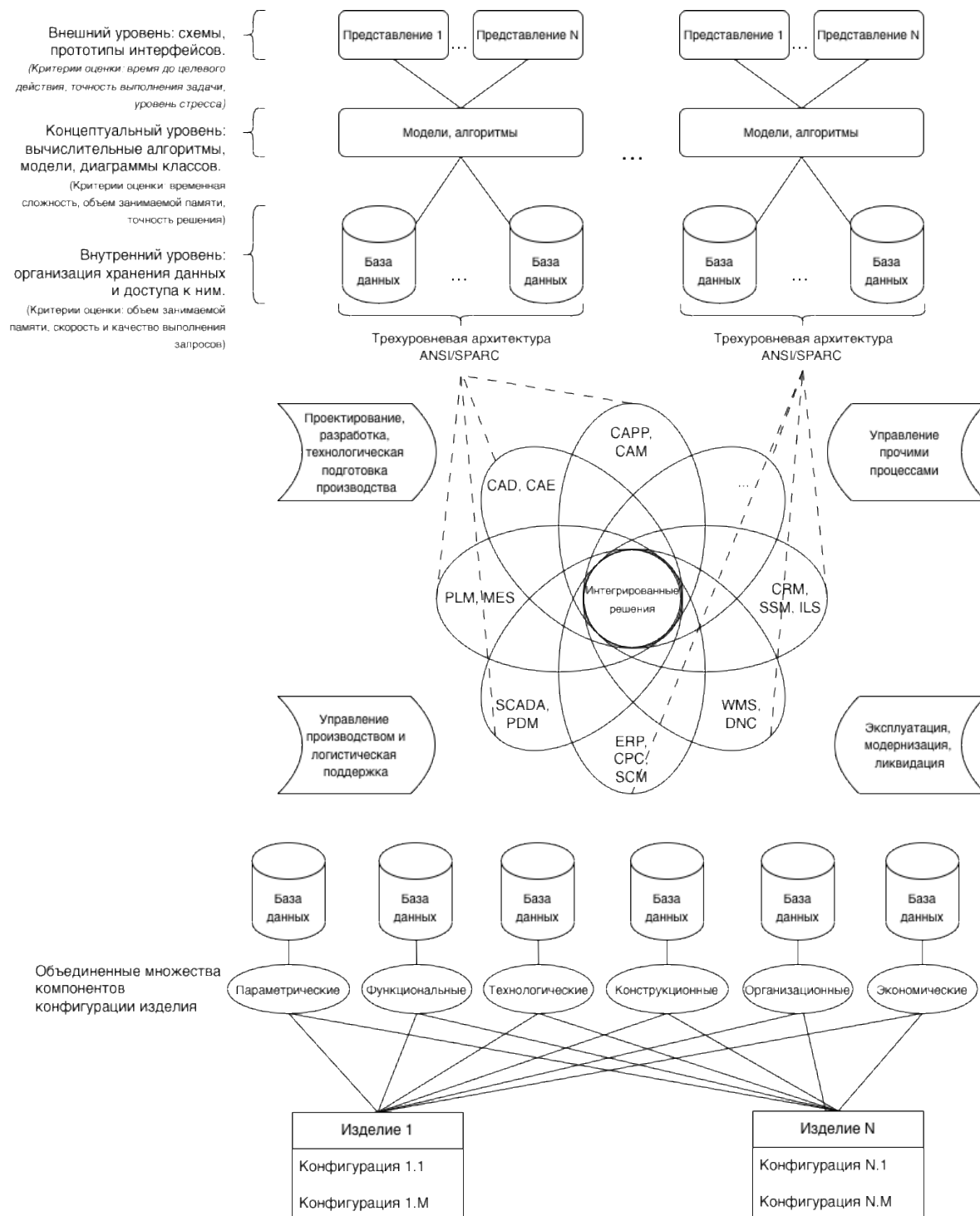


Рисунок 12 – Взаимосвязь объединенного множества параметров ЭСИ при управлении жизненным циклом и архитектурой СУ производством

Например, для гибких производственных модулей к таким характеристикам относятся: применяемые методы обработки, предельные габариты заготовок, мощность электроприводов, показатели точности и жесткости ключевых элементов станков (шпинделей, направляющих, суппортов), диапазоны скоростей главного движения и подач, вместимость инструментальных магазинов и другие параметры.

Показатели надежности отражают способность изделия поддерживать свою работоспособность в течение времени. В эту группу входят: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохранность.

Эргономические показатели описывают систему «человек–машина» (или «человек–изделие»), то есть соответствие конструкции антропометрическим и физиологическим особенностям пользователя. Сюда относятся, например, удобство размещения органов управления, величина прилагаемых усилий и другие факторы. Эта группа учитывает комплекс характеристик, связанных с человеческим фактором в производственных условиях: гигиенические, антропометрические, физиологические и психологические аспекты.

Эстетические показатели характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения. К эстетическим показателям относятся например: стилевое соответствие, соответствие моде, функционально-конструктивная приспособленность, организованность объемно-пространственной структуры, цветовой колорит, тщательность покрытия и отделки поверхности, чистота выполнения сочленений, округления и сопрягающихся поверхностей, четкость исполнения фирменных знаков, указателей, упаковки.

К показателям технологичности относятся:

- трудоемкость изготовления изделия;
- удельная материалоемкость изделия (удельная металлоемкость, удельная энергоемкость и пр.);

- технологическая себестоимость изделия;
- средняя оперативная трудоемкость технического обслуживания (ремонта) данного вида;
- средняя оперативная стоимость технического обслуживания (ремонта) данного вида;
- средняя оперативная продолжительность технического обслуживания (ремонта) данного вида;
- удельная трудоемкость изготовления изделия;
- трудоемкость монтажа;
- коэффициент применяемости материала;
- коэффициент унификации конструктивных элементов;
- коэффициент сборности.

Технологичность – свойство, характеризующее соответствие конструкции изделия методам и средствам ее изготовления применительно к конкретному предприятию. Технологичность изделия относится ко всем стадиям производства (получению заготовок, обработке, сборке, контролю, испытаниям, ремонту и восстановлению). К показателям технологичности относят:

- трудоемкость (T_p), представляющую собой продолжительность изготовления всего изделия в часах или минутах, затрачиваемых производственными рабочими при нормальной интенсивности труда;
- станкоемкость (C_s), рассматриваемую как промежуток времени, в течение которого станки и другое технологическое оборудование функционируют с целью изготовления всех элементов изделия и его последующей сборки. Станкоемкость определяется в станко-часах или станко-минутах;
- коэффициент использования материала (K_{im}), определяемый по формуле:

$$K_{im} = \frac{M_d}{M_z},$$

где M_d — масса детали, а M_z — масса заготовки;

- производственный цикл, определяемый интервалом календарного времени от начала до окончания изготовления изделия;
- конструктивную преемственность изделия (K_{pi}), определяемую отношением числа комплектующих элементов, которые использовались ранее в других изделиях (K_r), к общему числу комплектующих элементов данного изделия (K_i), а именно:

$$K_{pi} = \frac{K_r}{K_i}$$

- технологическую преемственность изделия, которая выражается возможностью использования применяемых ранее методов обработки и сборки при изготовлении данного изделия и может быть охвачена соответствующим показателем K_{pp} , определяемым по формуле:

$$K_{pp} = \frac{T_{ri}}{T_r},$$

где T_{ri} – суммарная трудоемкость ранее произведенных работ и сборки при изготовлении данного изделия; T_r – общая трудоемкость изделия.

В практике машиностроения применяют и другие показатели технологичности изделия. Например, может быть использован коэффициент применения новых и специальных средств технологического оснащения (станков, инструментов, приспособлений, контрольной оснастки и др.) – K_{is} , определяемый как отношение числа ранее используемых СТО (K_{ps}) к общему числу СТО (K_{sto}), требующихся для изготовления изделия.

Технологичность изделия является важнейшим критерием, определяющим соответствие технических, технологических и организационно-экономических условий для производства изделия возможностям конкретного предприятия. Одним из важнейших показателей технологичности следует считать время, затрачиваемое на технологическую подготовку производства.

Показатели транспортабельности характеризуют приспособленность продукции к перемещению в пространстве, не сопровождающуюся ее использованием или потреблением. К показателям транспортабельности относятся:

- средняя продолжительность подготовки продукции к транспортированию;
- средняя трудоемкость подготовки продукции к транспортированию;
- средняя продолжительность установки продукции на транспортное средство;
- коэффициент использования объема средства транспортирования;
- средняя продолжительность разгрузки партии продукции из транспортного средства.

Показатели стандартизации и унификации характеризуют насыщенность продукции стандартными, унифицированными и оригинальными частями, а также уровня унификации с другими изделиями: коэффициент применяемости, коэффициент повторяемости, коэффициент взаимной унификации, коэффициент унификации для групп изделий.

Патентно-правовые показатели характеризуют степень обновления технически решений, использованных в продукции, их патентную защиту, а также возможность беспрепятственной реализации продукции в России и за рубежом. К патентно-правовым показателям относятся: показатели патентной защиты, показатели патентной чистоты, показатели территориального распространения.

Экологические показатели характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающую при создании, эксплуатации и потреблении продукции. При выборе и определении этих показателей необходимо учитывать требования по охране окружающей среды. К экологическим показателям относятся: содержание вредных примесей, выбрасываемых в окружающую среду; вероятность выбросов в окружающую среду вредных частиц, газов, излучений при хранении, транспортировании, эксплуатации или потреблении продукции.

Показатели безопасности характеризуют особенности продукции, обуславливающие при ее использовании безопасность обслуживающего персонала. К показателям безопасности относятся: вероятность безотказной работы, время срабатывания защитных устройств, электрическая прочность изоляции токоведущих частей изделия, с которыми возможно соприкосновение человека.

При оценке уровня качества продукции необходимо учитывать экономические показатели, характеризующие затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию или потребление. Примерами экономических показателей качества могут быть: затраты на изготовление и испытания опытных образцов, себестоимость изготовления продукции, затраты на расходные материалы при эксплуатации технических объектов.

Процесс выбора номенклатуры показателей качества продукции на предприятии должен осуществляться в соответствии с целями управления качеством. Обоснование и выбор проводится с учетом назначения и условий использования продукции, анализа требований, задач управления качеством продукции, состава и структуры свойств и требований к показателям. Совокупность необходимых показателей качества продукции можно представить как нечеткое множество параметров $Y = \{x_y, \mu_y(x_y)\}$, где x_y – элементы соответствующих множеств, а $\mu_y(x_y)$ – соответствующие функции принадлежности.

В нечеткое множество параметров Y входят нечеткие подмножества: $A \subset Y, B \subset Y, C \subset Y, D \subset Y, E \subset Y, F \subset Y, G \subset Y, H \subset Y, I \subset Y, J \subset Y, K \subset Y$, где:

A – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей назначения x_A , т.е. $A = \{x_A, \mu_A(x_A)\}$;

B – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей надежности x_B , т.е. $B = \{x_{Bi}, \mu_{Bi}(x_{Bi})\}$;

C – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой эргономических показателей x_C , т.е. $C = \{x_{Ci}, \mu_{Ci}(x_{Ci})\}$;

D – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой эстетических показателей x_D , т.е. $D = \{x_D, \mu_D(x_D)\}$;

E – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей технологичности x_E , т.е. $E = \{x_E, \mu_E(x_E)\}$;

F – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей транспортабельности x_F , т.е. $F = \{x_F, \mu_F(x_F)\}$;

G – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей стандартизации и унификации x_G , т.е. $G = \{x_G, \mu_G(x_G)\}$;

H – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой патентно-правовых показателей x_H , т.е. $H = \{x_H, \mu_H(x_H)\}$;

I – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой экологических показателей x_I , т.е. $I = \{x_I, \mu_I(x_I)\}$;

J – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей безопасности x_J , т.е. $J = \{x_J, \mu_J(x_J)\}$;

K – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой экономических показателей x_K , т.е. $K = \{x_K, \mu_K(x_K)\}$.

Таким образом каждой конфигурации продукции соответствует конкретная номенклатура показателей качества, которая состоит из показателей различных групп вышеописанных нечетких множеств и заданных соответствующих функций принадлежности.

Так же выбор номенклатуры показателей качества системы управления машиностроительным производством должен осуществляться в соответствии с целями управления качеством. Совокупность необходимых показателей качества конфигурации системы управления можно представить как нечеткое множество параметров $I = \{x_i, \mu_i(x_i)\}$, где x_i – элементы соответствующих множеств, а $\mu_i(x_i)$ – соответствующие функции принадлежности.

В нечеткое множество параметров I входят нечеткие подмножества: $A_i \subset I, B_i \subset I, C_i \subset I, D_i \subset I, E_i \subset I, F_i \subset I, G_i \subset I, H_i \subset I, I_i \subset I, J_i \subset I, K_i \subset I$, где:

A_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей назначения x_{A_i} , т.е. $A_i = \{x_{A_i}, \mu_{A_i}(x_{A_i})\}$;

B_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей надежности x_{B_i} , т.е. $B_i = \{x_{B_i}, \mu_{B_i}(x_{B_i})\}$;

C_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой эргономических показателей x_{C_i} , т.е. $C_i = \{x_{C_i}, \mu_{C_i}(x_{C_i})\}$;

D_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой эстетических показателей x_{D_i} , т.е. $D_i = \{x_{D_i}, \mu_{D_i}(x_{D_i})\}$;

E_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей технологичности x_{E_i} , т.е. $E_i = \{x_{E_i}, \mu_{E_i}(x_{E_i})\}$;

F_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей распространения (переноса, копирования, мультиплицирования) x_{F_i} , т.е. $F_i = \{x_{F_i}, \mu_{F_i}(x_{F_i})\}$;

G_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей стандартизации и унификации x_{G_i} , т.е. $G_i = \{x_{G_i}, \mu_{G_i}(x_{G_i})\}$;

H_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой патентно-правовых показателей x_{H_i} , т.е. $H_i = \{x_{H_i}, \mu_{H_i}(x_{H_i})\}$;

I_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей энергоемкости x_{I_i} , т.е. $I_i = \{x_{I_i}, \mu_{I_i}(x_{I_i})\}$;

J_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой показателей безопасности x_{J_i} , т.е. $J_i = \{x_{J_i}, \mu_{J_i}(x_{J_i})\}$;

K_i – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой экономических показателей x_{K_i} , т.е. $K_i = \{x_{K_i}, \mu_{K_i}(x_{K_i})\}$.

Таким образом каждой конфигурации информационных систем соответствует конкретная номенклатура показателей качества, которая состоит из показателей различных групп вышеописанных нечетких множеств и заданных соответствующих функций принадлежности.

При этом каждое нечеткое подмножество нечеткого множества Y дизъюнктивно суммируется с нечеткими подмножествами нечеткого множества I .

Любая СУ может быть представлена в виде трехуровневой архитектуры. Внешний уровень которой представляет собой модель взаимодействия человека (пользователя) с системой, в виде интерфейсов, прототипов и пр. Концептуальный уровень может быть выражен в виде моделей, алгоритмов и диаграмм. А внутреннее представление архитектуры – это БД.

Организация и управления данными осуществляется через архитектуру базы данных. Данные о конфигурации изделия и его качестве используются в различных СУ, которые принадлежат этапам ЖЦ. Возникает ситуация, при которой этап или процесс ЖЦ может быть обеспечен несколькими системами или не обеспечен вовсе, приводя к функциональной избыточности или недостаточности.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

Построение сложной информационной архитектуры предприятия машиностроения следует рассматривать с точки зрения систем управления. Для оценки качества и надежности в архитектуре должны присутствовать все элементы СУ, которые позволят реализовать процесс управления. Тогда количественной оценкой качества СУ производством допустимо использовать величину ошибки, которая описывается с помощью дифференциального уравнения системы высокого порядка, и зависит от большого количества параметров системы. Для построения обобщенного множества критериев оценки СУ производством необходимо использовать 4 основные группы критериев качества управления: критерий точности, критерий запаса устойчивости, критерий быстродействия, интегральный критерий. Полная ошибка в таком случае определяется как среднеквадратичная ошибка случайных и неслучайной ошибок.

Работы по совершенствованию архитектуры Индустрии 4.0 и ее отдельных компонентов планируется осуществлять по трем направлениям:

1. Совершенствование структуры управляющих оболочек;
2. Обеспечение надежной бесперебойной связи между управляющими оболочками, в том числе и оболочками, реализованными в «облаке».
3. Разработка вариантов использования RAMI 4.0 для различных отраслей.

На современном этапе в РФ не разработана единая национальная концепция цифрового производства на уровне управления. Существующие инициативы в области цифровизации, носят фрагментарный характер и не образуют целостной системы. Активная разработка стандартов в приоритетных направлениях (интернет вещей, киберфизические системы, «умное производство») не компенсирует системный дефицит нормативной базы.

Для устранения выявленных диспропорций необходимо целенаправленное стимулирование деятельности по разработке и имплементации национальных стандартов в области цифрового производства.

В классификацию архитектурных моделей, реализующих принципы Industry 4.0, входят RAMI 4.0 и IIRA, обеспечивающие гибкое формирование информационных запросов. Однако на значительном числе промышленных предприятий продолжают эксплуатироваться устаревшие бизнес-архитектуры (PERA, GERAM, CIMOSA), ориентированные на жизненный цикл изделия и не адаптированные к требованиям киберфизических систем.

Выявленные ограничения определяют необходимость разработки национальной модели цифрового производства, включающей нормативно-правовое регулирование и институциональную поддержку стандартизации.

При этом применение холонических структур, распределенное мультиагентное и холархические принципы управления породили изменения в построении информационных архитектур, что позволило повысить точность и гибкость управления и качество автоматизации процессов. Благодаря горизонтальному самоподобию случаи заказов, продуктов и ресурсов могут обрабатываться аналогично номинальным случаям. Вертикальное самоподобие позволяет избежать необходимости в строгих иерархических уровнях.

Проведен анализ взаимосвязи параметров объединенного множества компонентов конфигурации, связанных с конструктивными, технологическими, функциональными и пр. ЭСИ с комплексом параметров оценки модели архитектуры автоматизированных систем управления машиностроительным производством на внешнем, концептуальном и внутреннем уровне на различных этапах жизненного цикла. Предложена и обоснована необходимость разработки моделей и методов оценки их качества и организации оптимальной архитектуры.

Для обеспечения качества управления и сбалансированной функциональности систем необходимо разработать методологию оценки и анализа показателей источника информации о задаче и результатах управления, что будет являться элементами системы автоматического управления. Для выбора оптимальной конфигурации СУ и выработке решения необходимо разработать алгоритмы оптимизации, подпрограммы и архитектуру СППР.

ГЛАВА 2. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Автоматизированная оценка уровня цифровой зрелости предприятий машиностроения с учетом модели жизненного цикла и иерархии процессов

Цифровая трансформация [50, 46] является стратегическим процессом преобразования предприятия. Она описывает преобразования, которые должно пройти предприятие для перехода на стадию Индустрии 4.0.

Существуют различные определения цифровой зрелости, которые часто замещаются понятием цифровая готовность [27]. Цифровая зрелость [68] — это систематический процесс адаптации предприятием постоянно меняющихся цифровых технологий. Этот термин заимствует смысл слова «зрелость», как способность правильно реагировать на изменения во внешнем мире за счет накопленных знаний и опыта. Для определения цифровой зрелости существуют различные инструменты, которые позволяют оценить деятельность организации по множеству факторов и определить ее готовность к цифровой трансформации.

Метод «Структура цифровой зрелости» (англ. Digital Maturity Framework) [214] от Digital Leadership Ltd был разработан для благотворительных и некоммерческих структур. Метод представляет собой анкетирование компании по 17 направлениям. Все направления поделены на 4 группы:

- 1) основные направления: культура, лидерство, коллаборации, бюджет, инновации;
- 2) ориентированные на людей: емкость, рекрутмент, обучение, управление проектами;
- 3) системы и данные: технологии, данные, отчетность, инсайты;
- 4) результаты и опыт: коммуникация, оптимизация, онлайн сервисы, внутренние системы.

Каждое направление оценивается уровнем от 1 до 5, где наблюдается градация вида «1 – худший вариант» и «5 – лучший вариант». При прохождении тестирования компанию просят указать свой тип (коммерческая или некоммерческая), а также размер (очень малый, малый, средний, большой, очень большой). После завершения анкетирования компания получает отчет со своими результатами, а также общую оценку в процентном соотношении.

BDC является банком Канады, который специализируется на услугах для предпринимателей. Ими был разработан собственный метод «Оценка цифровой зрелости» (англ. Digital Maturity Assessment) на основе разработок MIT Centre of Digital Business и Capgemini Consulting. Целью исследования было выявить зависимость между цифровой зрелостью компаний и прибылью.

В результате опроса составляется оценка по шкале от 1 до 120. Общая оценка составляется из суммы баллов по 2 критериям: цифровая интенсивность и цифровая культура. В рамках общей шкалы есть 4 диапазона, которые оценивают уровень цифровой зрелости. Градации равны между собой и составляют по 30 баллов.

Описание градаций представлено ниже:

1. Догоняющие (Latecomers) – практически не используют цифровые технологии.
2. Начинающие (Beginners) – используют цифровые технологии в основной для работы с клиентами, в продажах и маркетинге. Низкая интеграция внутри компании.
3. Развивающиеся – компания начинает использовать цифровые технологии на всех уровнях.
4. Продвинутые – компании используют цифровые технологии для своей трансформации.

После прохождения теста компании предлагается получить подробный бесплатный отчет, в котором отражена важность оценки цифровой зрелости, пояснения к результатам и вопросам, оценка относительно других компаний на рынке, рекомендацию по улучшению уровня цифровой зрелости.

Метод «Индикатор цифровой зрелости» (англ. Digital Maturity Benchmark) был разработан компанией Google [215] совместно с консалтинговой компанией BCG. Модель также использует метод анкетирования и позволяет определить уровень цифровой зрелости по 6 направлениям деятельности: сбор информации, активы и реклама, доступность, аудитория, автоматизация, организация. Каждое направление оценивается по шкале от 1 до 4.

Помимо моделей, разработанных частными компаниями на основе экспертизы в различных сферах бизнеса, также существуют исследования, которые оценивают другие модели, чтобы найти различия между ними и предложить лучшую модель. В работе [281] рассмотрены 30 различных моделей оценки цифровой зрелости, применимых для образования, здравоохранения, производства, управления государством и т.д. На основе собственных исследований авторы статьи приводят свою онтологическую цифровую модель, которая рассматривает 9 направлений и 18 их подвидов. Структура онтологической модели представлена на рисунке 13.

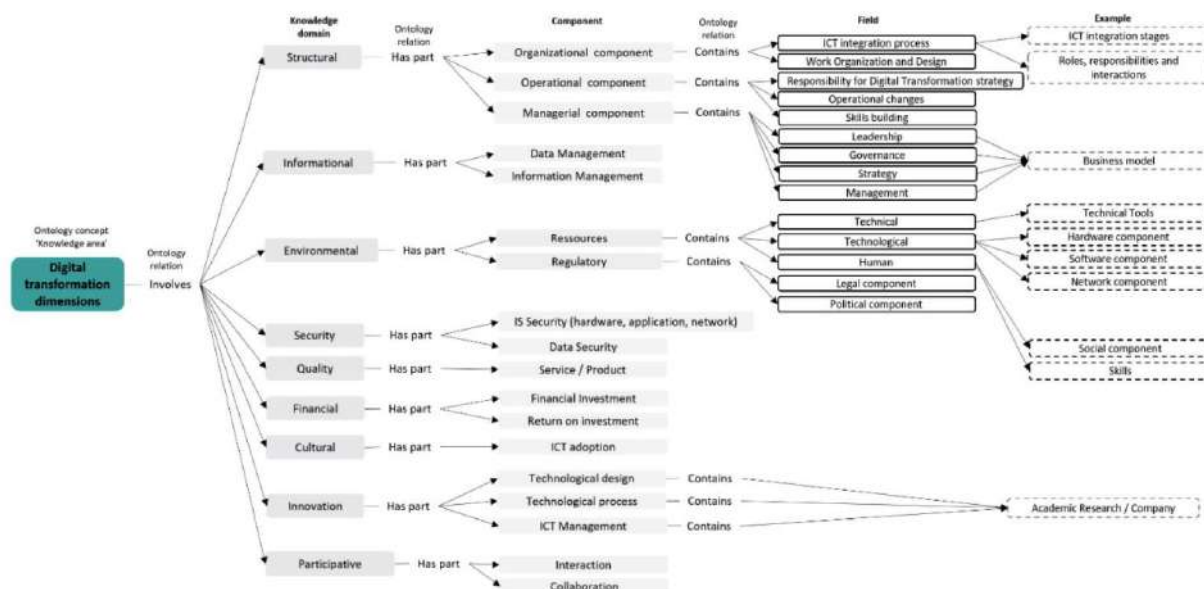


Рисунок 13 – Структура онтологической модели оценки УЦЗ

По горизонтали представлены направления и их подвиды согласно онтологической модели, а по вертикали представлены идентификаторы каждой из 30 моделей.

В результате приводится статистика, какая из моделей имеет наибольшее количество общих направлений с онтологической моделью и какие направления чаще всего рассматриваются в популярных моделях оценки УЦЗ. Они приходят к заключению, что ни одна из известных моделей не использует направления и их подвиды, а также какие направления наиболее часто встречаются в других моделях.

В России также были созданы свои модели оценки цифровой зрелости. Одной из самых известных считается модель «Организационное цифровое производство» (англ. Organizational Digital Manufacturing Maturity Model) (далее ODM3) [47], разработанная Московской школой управления Сколково. Впервые она была представлена в 2019 году для решения следующих задач:

- 1) оценка компаний через сопоставительный анализ (бенчмаркинг);
- 2) визуализация стадий развития компании;
- 3) определение направления развития;
- 4) моделирования экономического эффекта;
- 5) определение состояния отраслей.

Предусматривается применение модели в разных сферах деятельности, таких как:

- федеральное управление: министерство промышленности;
- отраслевые предприятия: машиностроение, металлургия;
- государственный институт развития промышленности: ФРП, АТР, ВЭБ;
- региональное управление: аппарат губернатора;
- предприятие производитель;
- инженерный центр, технологический предприниматель;
- управление образованием.

Основным способом получения данных является анкетирование. В рамках модели рассмотрены 3 группы направлений (разделов): проектирование и подготовка производства, производство и управление материально-техническим снабжением.

Список сегментов каждого раздела представлен ниже:

- 1) единая система управления информацией предприятия, единое информационное пространство, ЕИМ;
- 2) цифровое моделирование бизнес- процессов и технологических процессов компании;
- 3) конвергенция цифрового и физического в разрабатываемом продукте, полная информационная модель выпускаемого продукта (цифровой двойник);
- 4) корпоративная инновационная система;
- 5) интеграция в хозяйственную деятельность нематериальных активов (НМА) и результатов интеллектуальной деятельности (РИД);
- 6) цифровой реверс-инжиниринг, Digital Reverse Engineering (DRE);
- 7) аддитивное производство и быстрое прототипирование;
- 8) энергоэффективность и экологичность;
- 9) автоматизированные рабочие места в цехах, сбор данных от средств производства (Machine Data Collection, MDC) и дополненная реальность (Computer Aided Workshops, CAW);
- 10) производственная система;
- 11) цифровое управление логистикой;
- 12) трансфер технологий;
- 13) кросс-отраслевая кооперация;
- 14) учебные производственные центры и партнерство с образовательными платформами;
- 15) управление проектами.

Каждый сегмент оценивается 5 уровнями развития:

1. Случайный. Технологии в компании используются нерегулярно и без четких правил, однако руководство видит потенциал в их внедрении. Организационная культура компании характеризуется надменным отношением к технологиям.

2. Базовый. В компании реализован единый подход к внедрению технологий и проведена оценка их влияния на эффективность работы. Руководство понимает необходимость изменений и планирует дальнейшее использование технологий.

3. Управляемый. Менеджмент компании активно внедряет технологии в производственный процесс и операционную деятельность, обеспечивая необходимым образованием членов команд и руководителей. Компания использует гибкие подходы к внедрению технологий, формирует интеллектуальный капитал и извлекает уроки из опыта.

4. Интегрируемый. Внедрение технологий в компании согласуется со стратегическими целями и интегрируется в бизнес-процессы. Некоторые технологии уже успешно применяются в промышленной эксплуатации, и развитие компании основывается на полученных результатах.

5. Оптимизируемые. Компания разработала достаточно документированных процедур для тиражирования в рамках глобальной экспансии и систематизировала лучшие практики и уроки в информационных банках знаний. Результаты внедрения технологий оценены и описаны, компания тиражирует свои достижения на новые рынки через развитие сети дочерних предприятий.

Модель ODM3 также дает представление о том, как все сегменты модели связаны с разными стадиями жизненного цикла и их место в структуре промышленного интернета вещей.

В 2020 году Минпромторг запустил тестирование «Цифрового паспорта промышленного предприятия» [141, 126] – нового модуля в рамках Государственной информационной системы промышленности. Цифровой паспорт позволяет Минпромторгу оценить уровень развития промышленных предприятий России, сформулировать траекторию развития и меры поддержки.

В основе способом сбора информации о предприятиях является метод анкетирования. Анкета состоит из трех разделов:

1) общие сведения об организации: наименование, ОГРН, КПП, ИНН, юридический адрес, регион, округ, район город, отраслевая принадлежность по ОКВЭД2;

2) дополнительные сведения: краткое название, отрасль, курирующий департамент, тип и характер производства, размер компании, субъект МСП, статус, форма собственности, организационно-правовая форма, принадлежность к интегрированной структуре, головная организация, холдинг, дивизион, кластер, количество дочерних организаций;

3) технико-экономические характеристики: численность персонала, выручка (млн рублей), относительная численность рабочего персонала, относительная численность инженерно-технических работников, относительная численность административного и руководящего персонала.

Затем следует блок вопросов о бизнес-процессах предприятия. В рамках анкеты рассматривается 25 бизнес-процессов:

- 1) управление маркетинговыми исследованиями;
- 2) управление опытно-конструкторскими работами;
- 3) управление МТО и закупками;
- 4) управление подготовкой производства;
- 5) управление производством;
- 6) управление качеством продукции (контроль качества и испытания);
- 7) упаковка и хранение (управление складом готовой продукции);
- 8) управление сбытом и логистикой;
- 9) монтаж, эксплуатация и послепродажное обслуживание;
- 10) стратегическое управление предприятием;
- 11) управление финансами (бюджетирование, казначейство, бухгалтерский и налоговый учет);
- 12) управление ИТ;
- 13) управление персоналом;
- 14) юридическое управление;

- 15) управление эксплуатацией и обслуживанием оборудования;
- 16) управление безопасностью;
- 17) организационное развитие и повышение операционной эффективности;
- 18) управление документооборотом и корпоративным контентом;
- 19) управление охраной труда, экологией и промышленной безопасностью;
- 20) управление развитием и цифровизацией предприятия;
- 21) единое информационное пространство;
- 22) применение сквозных и наилучших доступных технологий;
- 23) применение технических средств автоматизации производственных процессов;
- 24) средства защиты информации;
- 25) уровень оснащения АРМ и высококвалифицированные кадры.

Разработка автоматического метода оценка уровня цифровой зрелости с учетом модели жизненного цикла и иерархией будет включать в себя основные элементы изученных ранее методов. Ключевыми особенностями станут взаимосвязь всех элементов друг с другом, описание процессов по иерархии, а также использование модели жизненного цикла.

Примером подобной архитектуры будет являться сетевой граф, с типом связи «от многих к многим». Общая архитектура представлена на рисунке 14.

Первый уровень состоит из процессов предприятия. Каждый элемент слоя имеет номер с индексом А. Второй уровень представляет собой стадии жизненного цикла. Каждый процесс связан с каждой стадией жизненного цикла. Данная связь описывает влияние процесса на определенную стадию жизненного цикла, форму воздействия на данной стадии, а также уровень ее автоматизации.

Оценка будет определяться по трем направлениям: процессы, жизненный цикл и системы управления машиностроительным производством. В каж-

дом направления будут учтены его составляющие элементы и дана их характеристика. Преимуществом модели будет возможность оценки наличия и уровня развития систем управления машиностроительным производством на каждом этапе жизненного цикла и в каждом процессе.

На данный момент существует множество систем управления машиностроительным производством, которые позволяют повысить эффективность процессов предприятия. Виды систем автоматизации описаны в таблице 2.

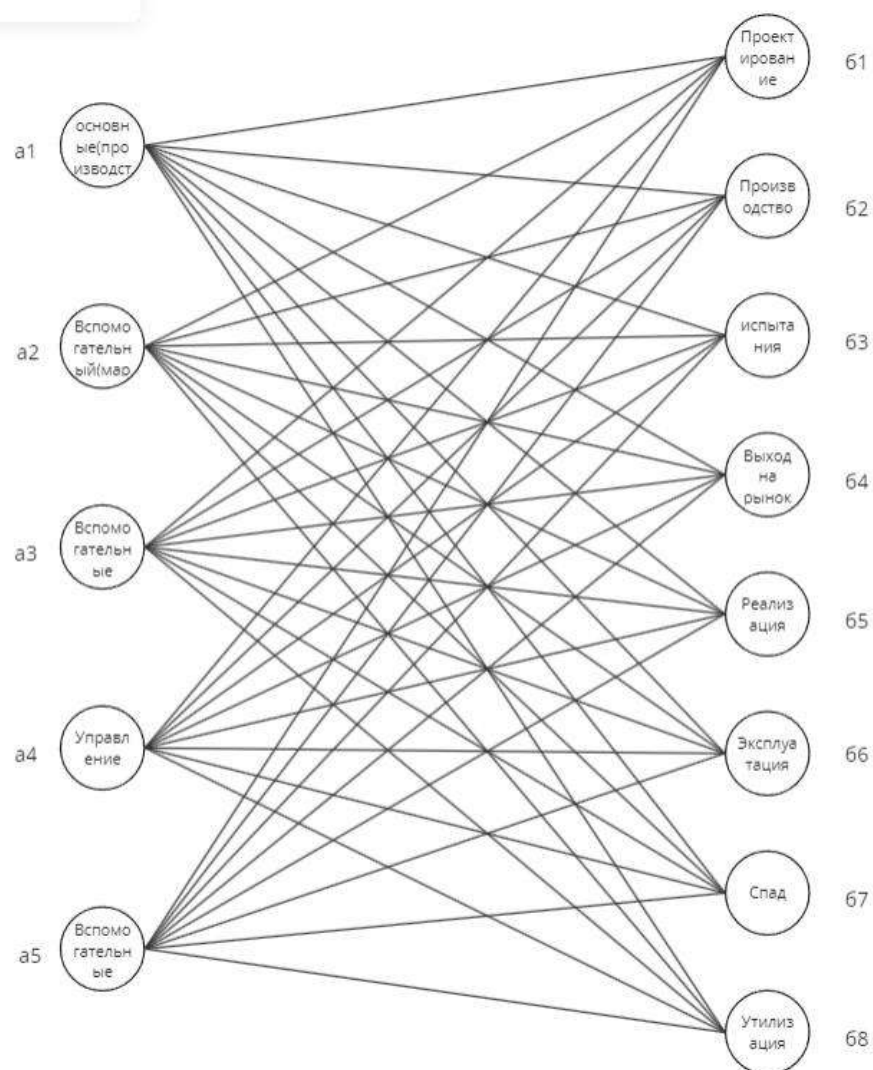


Рисунок 14 – Пример сетевого графа

Таблица 2 – Виды информационных систем управления машиностроительным производством

№ п/п	Наименование	Функции
1	ERP (англ. Enterprise Resource Planning) – система планирования (управления) ресурсами предприятия	Автоматизирует процедуры, создающие процессы
2	CRM (англ. Customer relationship management) – модель взаимодействия, по поддержке эффективного маркетинга, продаж и обслуживания клиентов	Организует работу с ориентировкой на потребности клиента, на совершенствование продаж товара (услуги), а не на производство
3	ECM (англ. Enterprise Content Management) – система управления цифровым контентом	Охватывает все процессы предприятия в едином, структурированном информационном поле
4	CPM (англ. Customer Relationship Management) – управление взаимоотношениями с заказчиками	Отслеживает и управляет эффективностью деятельности компании. Дополняет функции отчетности и анализа функциями консолидации, бюджетирования, стратегического планирования и прогноза
5	HRM (англ. Human Resource Management) – автоматизированная комплексная система управления персоналом	Обладает расширенной функциональностью кадрового учета,
6	EAM (англ. Enterprise Asset Management) – информационная система автоматизации процессов, связанных с техническим обслуживанием оборудования, его ремонтом, а также послепродажным	Помогает сократить расходы, связанные с ремонтом и обслуживанием оборудования

№ п/п	Наименование	Функции
	обслуживанием этого оборудования	
7	EDMS (англ. Electronic Document Management) – система управления документами предприятия	Обеспечивает управление версиями документов, разграничением прав доступа, репликацию на другие БД и подобные системы
8	Workflow (англ. Business Process Management (BPM)) – система, документооборота предприятия	Применяется в ERP, системах работы с заявками, начиная от простого поручения до конечных маршрутов и версий используемых документов
9	CAE (англ. Computer Aided Engineering) – автоматизированные расчеты и анализ	Проводит анализа моделирования и изучения поведения модели CAD (решение инженерных задач (расчет конструктивной прочности, анализ термодинамических и гидрогазодинамических процессов, динамики систем и механизмов и др.)
10	CAD (англ. Computer Aided Design) – автоматизированное проектирование	Определение геометрии конструкции для последующего использования в системах САМ и САЕ
11	CAM (англ. Computer Aided Manufacturing) – автоматизированная технологическая подготовка производства	Используется для планирования, управления и контроля операций производства, для подготовки программ для станков с ЧПУ, в том числе

№ п/п	Наименование	Функции
12	PDM (англ. Product Data Management) – управление проектными данными	Управляет составом изделия, структурой всех его составных частей, деталей, узлов и агрегатов, а также – структурой оснастки, инструментального парка, операций и переходов, технологических приемов
13	CAPP (англ. (Computer-Aided Process Planning) – САПР ТП (системы автоматизированного проектирования технологических процессов) или АС ТППП (автоматизированные системы технологической подготовки производства)	Является интерактивной средой, наполненной базами данных по материалам, сортаменту, оборудованию, технологическому оснащению и прочей справочной информацией.
14	PLM (англ. Product Lifecycle Management) – управление данными жизненного цикла изделий	Обеспечивает управление всей информацией об изделии и связанных с ним процессах на протяжении всего его жизненного цикла. Информация об объекте, содержащаяся в PLM-системе, является цифровым макетом этого объекта
15	IETM (англ. Interactive Electronic Technical Manuals) – интерактивные электронные технические руководства	Предоставляет в интерактивном режиме справочную и описательную информацию об эксплуатационных и ремонтных процедурах, связанных с конкретным изделием. Обеспечивает возможность

№ п/п	Наименование	Функции
		прямого взаимодействия с модулями диагностики изделий, а также организации автоматизированного заказа запасных частей и материалов
16	MES (англ. Manufacturing Execution System) – производственная исполнительная система	Синхронизирует, координирует, анализирует и оптимизирует выпуск продукции в рамках какого-либо производства. Обеспечивает интеграцию с другими системами управления предприятием, такими как SCM, ERP, АСУТП
17	SCM (англ. Supply Chain Management) – управление цепочками поставок	Производит комплексную автоматизацию закупок, проводимых государственными предприятиями и учреждениями, в том числе, в соответствии с требованиями, установленными №223-ФЗ
18	SCADA (англ. Supervisory Control And Data Acquisition) – диспетчерское управление производственными процессами	Производит сбор и обработку данных о состоянии оборудования и технологических процессов.
19	CNC (англ. Computer Numerical Control) – Компьютерное числовое управление	Обеспечивает управление технологическим оборудованием с числовым программным управлением (ЧПУ) на базе встроенных контроллеров с числовым программным управлением (ЧПУ)

Для автоматического анализа уровня цифровой зрелости можно использовать открытый доступ к рабочим местам и провести инвентаризацию информационных активов, сопоставив их с этапами жизненного цикла уровнем иерархии процессов.

2.2. Взаимосвязь параметров систем управления машиностроительным производством и объединенного множества параметров электронных структур изделия

На сегодняшний день не сложилось целостного представления о методах формирования технологических, производственных, организационно-экономических и других типов ЭСИ. Очевидно, что базисом для их создания являются конструктивные ЭСИ, выраженные в виде сложноподчиненных графов. Тогда соответствующие ЭСИ изделия конкретной конфигурации и производной от него ЭСИ экземпляра продукции будет частным случаем совокупности ветвей графа от корневой вершины до множества соответствующих конечных вершин. Пример представления взаимосвязи конструктивных параметров в виде обобщенного двухуровневого графа типа дерево приведен на рисунке. Некоторые элементы конструкции могут иметь несколько модификаций в разных количествах. Для расчета количества возможных конфигураций необходимо каждый из этих элементов представить в виде графа типа дерево и совершить формальную трансформацию в граф типа дерево с учетом возможных модификаций элементов (рисунок 15) [120, 121].

Для построения технологической ЭСИ необходимо использовать схему взаимосвязей элементов (рисунок 16, а). Операции технологического процесса могут осуществляться последовательно и/или могут быть разбиты на параллельные подпроцессы. Например, последовательность операций может быть представлена в виде цепочки (рисунок 16, б), или таблицы (таблица 3), в каждой строке которой элементы записаны в соответствии с этапами технологического процесса. В результате полного перебора вариантов можно вычислить количество возможных последовательностей вариантов операций и переходов.

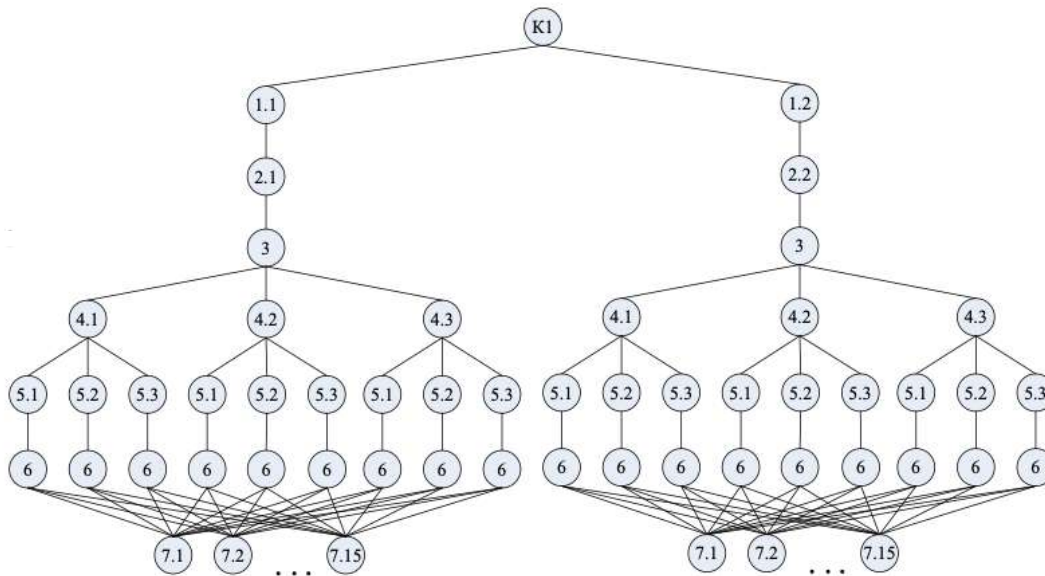


Рисунок 15 – Пример представления конструктивного ЭСИ в виде графа типа дерево

Таблица 3 – Примеры представлений технологической ЭСИ

№ п/п $K_{\text{посл.}}$	№ элемента						
1	1	2	3	4	5	6	7
2	1	4	2	3	5	6	7
3	1	4	5	6	7	2	3
...							
$K_{\text{посл.}} = 20$	1	7	6	5	4	2	3

Технологическая ЭСИ включает в себя множество других операций: изготовление, сборка, контроль, испытания, настройка и т.п. В отличие от конструктивной ЭСИ, в котором основным элементом графа является узел, при переходе к технологическому ЭСИ, на основе конструктивного, ключевым элементом следует считать ребро графа, которое символизирует физическую взаимосвязь и другие соотношения между элементами. На ребре графа можно отражать дополнительную информацию о рассматриваемой взаимосвязи, например: перечень осуществляемых переходов ($\Pi_{i,j}$), сборочные комплекты ($K_{i,j}$) (рисунок 17). Переход при этом является неделимой элементарной частью любой операции технологического процесса. Для этого необходимо определить свойства каждой связи элементов при сборке. В общем случае достаточно каждому ребру графа ОМКК присвоить свой уникальный номер $r_{i,j}$,

где i, j – номера элементов, между которыми установлена связь. Далее следует определить различные характеристические множества.

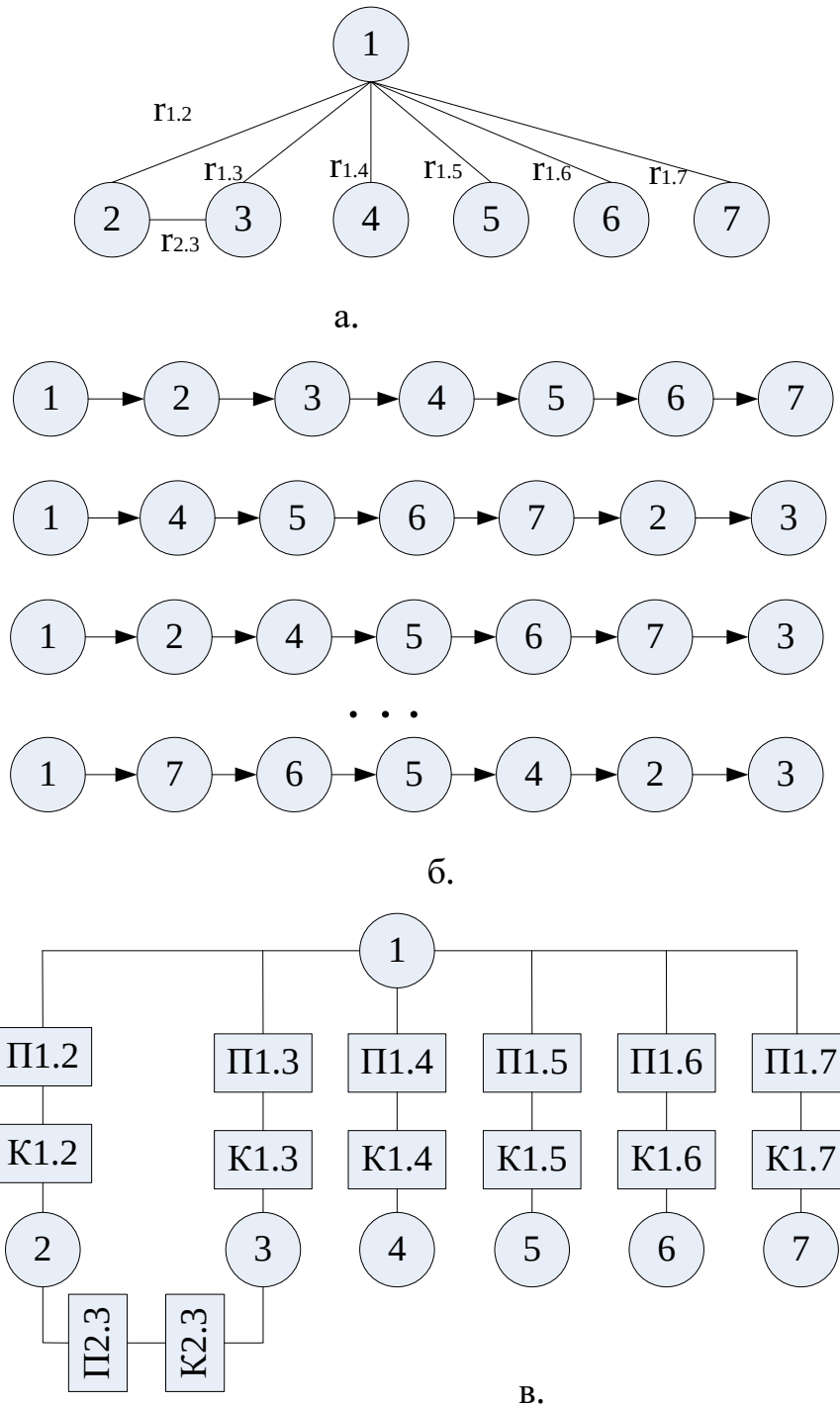


Рисунок 16 – Схема взаимосвязи элементов: а – схема взаимосвязи элементов; б – варианты последовательностей операций; в – пример представления на ребре графа дополнительной информации о ТП.

При этом каждая конфигурация будет определена собственными множествами. В результате для изделия в целом можно сформировать комплекс объединенных множеств для каждого атрибута технологического процесса в виде

диаграмм Венна, которые будут показывать все возможные отношения между следующими объединенными множествами: переходов $\{P_{\Sigma}\} = \bigcup_{k=1}^K \{P_k\}$, где $\{P_k\}$ – множество переходов для k – конфигурации; комплекты $\{K_{\Sigma}\} = \bigcup_{k=1}^K \{K_k\}$, где $\{K_k\}$ – множество комплектов для k –ой конфигурации; оборудования $\{O_{\Sigma}\} = \bigcup_{k=1}^K \{O_k\}$, где $\{O_k\}$ – множество оборудования для k –ой конфигурации; сборочной технологической оснастки $\{O_{c\Sigma}\} = \bigcup_{k=1}^K \{O_{c_k}\}$, где $\{O_{c_k}\}$ – множество технологической оснастки для k –ой конфигурации; режимов $\{P_{\Sigma}\} = \bigcup_{k=1}^K \{P_k\}$, где $\{P_k\}$ – множество технологических режимов для k –ой конфигурации. Могут быть использованы и другие подобные множества.

Таким образом, можно сформировать описание любого объединенного множества в виде таблицы, в которой каждому элементу множества будет соответствовать строка таблицы с перечнем свойств (Приложение А). Поскольку основной неделимой частью технологического процесса является технологический переход, целесообразно этот параметр сделать ведущим при формировании технологической ЭСИ. Каждому параметру P_k объединенного множества переходов $\{P_{\Sigma}\}$ будет соответствовать свой набор параметров остальных объединенных множеств, в том числе параметры ТП такие как: возможность выполнения перехода на существующем оборудовании, точность или погрешность получаемого множества параметров $\{\Delta P_i\}$, трудоемкость T , себестоимость S , коэффициент автоматизации A_v и пр. Алгоритм оформления маршрутов и операций ТП упрощенно можно представить в виде совокупности процедур формирования и оптимизации параметров каждого перехода и последовательного формирования полного набора технологий. Параметры технологического процесса являются итоговыми результатами проектирования, на основании которых можно вести оптимизацию.

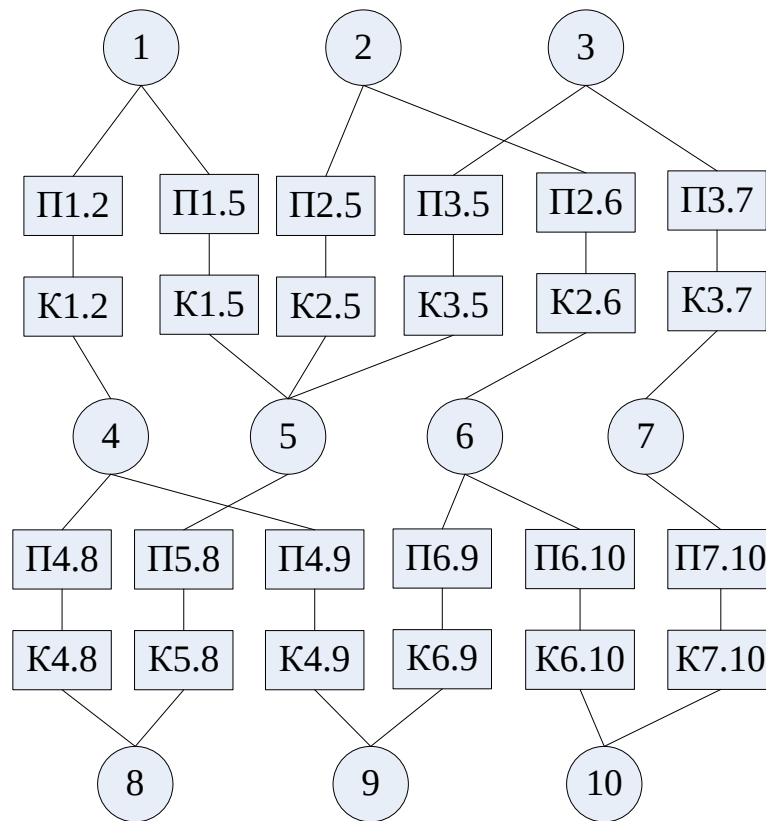


Рисунок 17 – Представление объединенных множеств переходов и комплек-
тов

Таким образом, принципы формирования технологической ЭСИ в достаточной степени приближены формам представления их конструктивных аналогов и непосредственно вытекают из последних. Это позволяет производить расчет количества возможных последовательностей операций, формирование объединенных множеств параметров и структур технологического процесса.

Проблема повышения производительности систем управления машиностроительным производством – одна из ключевых задач в современных условиях стремительного развития технологий и высокой конкуренции.

С использованием реляционных баз данных может быть автоматизировано описание объединенных множеств параметров и свойств технологического процесса. В результате при проектировании новой конфигурации каждому ребру графа, соответствующему определенной операции технологического процесса, будут принадлежать параметры каждого объединенного множества.

База данных является основой любой СУ производством. Для решения задач при управлении жизненным циклом продукции необходимо эффективно обрабатывать и анализировать огромные массивы данных для принятия обоснованных решений. Высокопроизводительные системы управления машиностроительным производством позволяют сократить время на обработку и анализ данных, что является критически важным для своевременной реакции на изменения в рыночной среде и потребительских предпочтениях. Помимо анализа и обработки данных, необходимо эффективно ими управлять. Каждая транзакция, происходящая в базе данных, должна затрачивать минимум ресурсов. Хранение данных также является важным аспектом. Однако, чем большее количество процессов автоматизировано, тем больше нагрузки ложится на системы управления машиностроительным производством, поэтому для повышения их производительности требуется оптимальное распределение нагрузки.

Рост киберугроз и необходимость обеспечения информационной безопасности способствуют созданию нестабильного внешнего окружения. Повышение производительности позволяет внедрять системы мониторинга и защиты, снижая риски и обеспечивая защиту данных.

Таким образом, современные системы управления машиностроительным производством должны не только справляться с возрастающими нагрузками, но и обеспечивать стабильную работу в условиях нестабильного внешнего окружения. При использовании более структурированных данных можно рассчитывать на лучший результат работы системы управления машиностроительным производством. Структурированность данных обеспечивается с помощью валидации.

Все решения задачи повышения производительности систем управления машиностроительным производством сводятся к разработке наиболее эффективных методов управления данными, а также их хранения, анализа и обработки.

При постановке задачи повышения производительности систем управления машиностроительным производством можно выделить ряд принципов, при соблюдении которых системы будут работать достаточно эффективно. Эти принципы могут быть следующими:

- принцип комплексности – стремление минимизировать сложность в системе, чтобы повысить ее эффективность и удобство использования;
- принцип группирования – организации элементов таким образом, чтобы они были сгруппированы по порядку и частоте их использования.
- принцип доступности – к информации должен быть обеспечен быстрый доступ;
- принцип адаптивности – система управления предприятием должна быть достаточно гибкой, чтобы соответствовать потребностям и особенностям различных групп пользователей;
- принцип контроля ошибок – системы управления предприятием должны быть спроектированы таким образом, чтобы минимизировать возможность появления ошибок со стороны пользователей или предоставлять простые и эффективные средства для их исправления;
- принцип достаточности времени на исправление ошибок – системы управления предприятием должны предоставлять пользователю достаточное время для обнаружения и надежного исправления ошибок.
- принцип распределения функций – системы управления машиностроительным производством должны быть спроектированы так, чтобы не нагружать пользователей чрезмерными требованиями, такими как высокая скорость или точность ввода данных.

Однако можно отметить общий недостаток количественных методик, позволяющих точно оценивать эффективность различных решений. Большинство существующих методов носит качественный характер и не всегда обеспечивает необходимую точность оценок.

2.3. Анализ комплекса критериев для оценки систем управления машиностроительным производством

Одним из ключевых направлений развития любой организации является автоматизация процессов. Каждому виду процессов может соответствовать различная система автоматизации. Появления концепции технологий CALS/ИПИ (Continuous Acquisition and Life Cycle Support / Информационная Поддержки ЖЦ Изделий) способствовало ускорению темпов внедрения информационных технологий в промышленности [139]. Постоянный реинжиниринг бизнес-процессов, управление качеством, возможность использования параллельного инжиниринга – эти концепции CALS/ИПИ технологий, изменили подходы к созданию продукции.

На сегодняшний день почти каждая организация имеет информационную систему (ИС), которая позволяет автоматизировать большинство процессов, и в современном мире без тотальной информатизации невозможно говорить о конкурентоспособности. Однако часто из-за недостатков в процессе управления проектированием и работе в области внедрения изменений упускаются важные аспекты, которые не приводят к ожидаемым результатам. Так как любая ИС – это сложный объект, который охватывает и процессы, которые требуется автоматизировать, и разработчиков, и пользователей, и технологии, то построение модели системы управления машиностроительным производством вызывает определенные трудности. Для оценки и сравнение различных качеств, параметров ИС необходимо иметь перечень показателей, которые можно измерить.

Цель модели CISE — предоставить обобщенный список критериев для оценки информационной системы или части системы управления машиностроительным производством. Критерии, ориентированы на оценку набора критериев по различным направлениям или «темам». Связанные между собой «темы» в свою очередь группируются в «класс». В итоге получается иерархи-

ческая модель набора критериев для изучения системы управления машиностроительным производством. Эту иерархию можно представить в виде древовидной структуры.

В работе [232, 266] предложено использование модели CISE (Criteria for Information Systems Evaluation), которая представляет собой набор из 84 критериев, разделенных на 17 тем, которые входят в 5 классов, с помощью которых можно наиболее полно описать системы управления машиностроительным производством и взаимодействие с ней (таблица 4).

Таблица 4 - Классификация критериев оценки системы управления машиностроительным производством

Класс критериев	Категория	Наименование критериев	Кол-во критериев
1. Организационные	Управление	Точность и скорость принятия решений, гибкость, управляемость, управление знаниями, стандарты, следование законам, поддержка	8
	Экономика	Конкурентоспособность, удовлетворенность пользователя, продуктивность, ROI, текущие расходы, достаточное количество ресурсов	6
	Лояльность пользователей	Выполнение обязательств, наличие организованной системы поддержки и управления, вовлеченность руководства в процесс поддержки, вовлеченность сотрудников в процесс поддержки	4

Класс критериев	Категория	Наименование критериев	Кол-во критериев
	Производительность	Загруженность системы, частота ошибок, эффективность распределения информации, простота системы	4
Пользовательские	Коммуникации	Сопричастность, компетентность пользователей, информированность, социальное взаимодействие пользователей	4
	Адаптивность	Демократичное отношение к потребностям пользователей, возможность влиять и настраивать систему под индивидуальные потребности пользователя, обучение, удовлетворенность	5
	Эргономика	Возможность самостоятельно контролировать работу системы, информационная и функциональная нехватка или избыточность, уровень стресса	4
Качественные	Доступность	Доступность функций, соответствие формату, легкость поиска необходимой информации	3
	Сохраняемость	Возможность архивации, верификация и валидация	3

Класс критериев	Категория	Наименование критериев	Кол-во критериев
	Качество	Точность, важность, объективность, актуальность информации системе, надежность системы, уникальность	6
Технологические	Аппаратное обеспечение	Легкость управления оборудованием, соответствие аппаратного обеспечения и выполняемым функциям, масштабируемость	3
	Безопасность	Дублирующие каналы, конфиденциальность, стабильность, регулярные обновления и поддержка, достоверность	5
	Программное обеспечение	Администрирование системы, доступность обновлений ПО, модифицируемость, совместимость, лицензирование, заменяемость, понятность структур кода, использование стандартных компонентов кода	8
	Удобство использования	Конфигурируемость, эффективность решения задач, ошибки из-за путанности в системе, обучаемость новых пользователей, скорость запоминания действий пользователя, быстрота	6
Системные	Система управления	Наличие акцентов на важной информации, наличие обратной	6

Класс критериев	Категория	Наименование критериев	Кол-во критериев
		связи, наличие информационных фильтров, наличие необходимого информационного разнообразия, наличие сенсорного наблюдения, дееспособность	
	Соответствие требованиям	Соответствие библиотеке инфраструктур ITIL, восприятие человеком системы, соответствие методологии SSM (Soft Systems Methodology), соответствие техники бережливого производства VSM (Value Stream Mapping)	4
	Свойства системы	Конгруэнтность, культурная идентичность, соответствие ожиданиям пользователя, полезность, целесообразность	5
		ВСЕГО:	84

1. Класс критериев «Организационные»

Критерии класса «Организационные» — это критерии, которые оценивают взаимное влияние или взаимодействия системы управления машиностроительным производством и организации. Внутри этого класса представлено несколько категорий: «Управление», «Экономика», «Лояльность», «Производительность».

Категория «Управление» в основном описывает те аспекты информационной системы, которые помогают руководству организации поддерживать управленческие функции. Примером этого является критерий «Точность и

скорость принятия решения», который описывает, в какой степени системы управления машиностроительным производством помогает руководству принимать точные решения на основе текущего набора доступной информации. Категория «Управление» также включает управление информационной системой, поскольку она является частью организации. Примером этого является критерий «Управление знаниями», который описывает, насколько быстро и качественно руководство может получить нужный набор данных о системе управления машиностроительным производством.

Категория «Экономика» описывает экономические выгоды, а также затраты на поддержку и обслуживание системы управления машиностроительным производством [242, 298, 272]. Примером является критерий «Конкурентоспособности», который описывает, насколько хорошо системы управления машиностроительным производством обеспечивают предприятию конкурентное преимущество в своей области деятельности.

Категория «Лояльность пользователей» описывает взаимодействие сотрудников организации с системой управления машиностроительным производством, а также эмоциональные отношения человека и системы. Двумя примерами этого являются критерии «Вовлеченность руководства в процесс поддержки» и «Вовлеченность сотрудников в процесс поддержки», которые описывают заинтересованность сторон в улучшении функциональности системы управления машиностроительным производством.

Категория «Производительность» описывает функциональные аспекты системы управления машиностроительным производством, а также то, какие, как правило, возникают проблемы [284, 267]. Примером последнего является критерий «Эффективность распределения информации», который описывает, как часто информация имеет тенденцию накапливаться в одном месте.

2. Класс критериев «Пользовательские»

Класс критериев «Пользовательские» оценивает, насколько системы управления машиностроительным производством повышает производитель-

ность пользователей, насколько пользователи удовлетворены взаимодействием с системой с точки зрения социальных коммуникаций, эргономики и адаптивности самой системы.

Категория «Коммуникации» состоит из критериев, которые связаны с тем, в какой степени системы управления машиностроительным производством включает пользователя в контекст посредством предоставления информации, необходимой для выполнения заданных функций человека как сотрудника и социальных коммуникаций внутри организации [211]. Примером одной из возможных проблем с коммуникацией может быть недостаточность или наоборот избыточность информации о мероприятиях и встречах, которые планируются или проводятся на предприятии.

Категория «Адаптивность» содержит критерии, связанные с тем, насколько человек может контролировать и влиять на результаты взаимодействия с системой управления машиностроительным производством, обучаться и настраивать систему под свои нужды. Примером является критерий «Возможность влиять и настраивать систему под индивидуальные потребности пользователя», который описывает, насколько хорошо человек способен использовать систему управления машиностроительным производством для внесения предложений и изменений. Критерий «Обучение» описывает степень, в которой пользователь может развивать новые компетенции, а не просто использовать существующую для решения своих задач.

Категория «Эргономика» оценивает уровень стресса и удовлетворенности при взаимодействии человека и системы управления машиностроительным производством. Проблемная ситуация является может быть оценена критерием «Информационная и функциональная нехватка или избыточность», когда человек получает слишком много или мало информации, чтобы справиться с ней без стресса.

3. Класс критериев «Качественные»

Класс критериев «Качественные» описывает качество, сохраняемость и доступность информации в системе.

Категория критериев «Доступность» описывает, насколько легкодоступна часть информации в системе [196, 202]. Одним из примеров критерия в этой категории является критерий «Легкость поиска необходимой информации», который описывает, насколько в системе хватает функциональных возможностей для поиска определенной информации.

Категория критериев «Сохраняемость» описывает то, как организовано управление информацией с течением времени [197, 195]. Концептуально эти критерии влияют на работу с архивом данных или переход от одного решения к другому в системе управления машиностроительным производством. Одним из примеров критерия является критерий «Верификация и валидация», который описывает, насколько легко определить источник информации после ее сохранения или архивирования.

Категория критериев «Качество» описывает, насколько информация в системе соответствует своему предполагаемому использованию или какая часть информации не соответствует тому, что предполагалось. Одним из примеров последнего является критерий, который описывает, насколько релевантна информация, поступающая в систему.

4. Класс критериев «Технологические»

Класс критериев «Технологические» — это критерии, которые относятся к аппаратному и программному обеспечению, участвующим в распространении и управлении информацией.

Категория критериев «Аппаратное обеспечение» описывает то, что связано с физическими объектами в системе управления машиностроительным производством, такими как коммуникационное оборудование, компьютеры и пр. Одним из примеров критерия в этой категории является «Масштабируемость», которая описывает, насколько хорошо оборудование сможет адаптироваться, если в системе потребуется выполнять больше задач.

Категория критериев «Безопасность» описывает, насколько хорошо реализованы меры, применяемые для защиты информации [260]. Это включает защиту как от просмотра неавторизованными лицами, так и от уничтожения,

например, при сбоях оборудования. Примером первого является критерий, который описывает, насколько хорошо информация скрыта от просмотра посторонними. Примером последнего является критерий «Стабильность», который описывает риск сбоев или отказов, приводящих к потере или ухудшению качества информации.

Категория критериев «Программное обеспечение» относится к программным частям системы управления машиностроительным производством, описывая насколько хорошо установленное программное обеспечение справляется со своими задачами. Примеры критериев в этой категории включает критерий «Администрирование системы», который описывает, насколько легко управлять программным обеспечением, и «Лицензирование», которое описывает, в какой степени лицензионные ограничения использовать программное обеспечение оптимальным образом.

Категория критериев «Удобство использования» описывает качество интерфейса для человеко-машинного взаимодействия. Одним из примеров критерия здесь является «Эффективность решения задач», который описывает, сколько усилий требуется пользователю, чтобы решить поставленную задачу.

5. Класс критериев «Системные»

Класс критериев «Системные» рассматривают систему управления машиностроительным производством с точки зрения управления. Эти критерии оценивают, насколько хорошо информационная система соответствует современным стандартам и актуальным технологиям.

Категория критериев «Система управления» описывает те аспекты системы управления машиностроительным производством, которые выводятся с точки зрения теории систем [227]. Одним из примеров этого является критерий «Наличие необходимого информационного разнообразия», который описывает гибкость и адаптивность системы при изменении условий окружающей среды.

Категория критериев «Соответствие требованиям» отличается от всех других тем, что она не описывает конкретные критерии [240, 254, 205, 226]. Вместо этого она перечисляет набор моделей, с которыми можно сравнить систему управления машиностроительным производством. Критерии в этой категории следует рассматривать как набор инструкций высокого уровня на соответствие требованиям библиотеке ITIL (Information Technology Infrastructure Library - библиотека информационно-технологических инфраструктур), методологии SSM (Soft Systems Methodology – методологии мягких систем) [207], соответствие методологии VSM (Value Stream Mapping – карта потока создания ценности) [302].

Категория критериев «Свойства системы» относится к системе в целом, а не к ее частям, или к ее функционированию в определенном аспекте. Примером критерия здесь является критерий «Конгруэнтность», который описывает общее понимание и ощущения, что система выполняет то, что должна.

Таким образом CISE предоставляет обширный набор критериев для оценки системы управления машиностроительным производством. Однако большинство критериев не имеют какой-либо конкретной системы расчета или оценки. Тем не менее, они могут служить основой для дальнейшего исследования.

Одним из вариантов использования может быть то, что исследователи, которым необходимо оценить систему управления машиностроительным производством, используя предложенный список критериев, выбирают нужные и выставляют весовые коэффициенты и подбирают метод оценки. Например, составляется список с приоритетами: отметка «хорошо» для того, что не нужно решать, «предупреждение» для того, что проблематично, и «критично» для того, что необходимо решить, где столбцы «критический», «предупреждение» и «нормальный» имеют названия соответствующие обозначения: «С», «W» и «О». С этим приоритетным списком критериев можно будет получить обзор того, какие области информационной системы требуют наибольшего внимания.

Следует подчеркнуть, что сама по себе модель не является моделью для развития системы. CISE используется как модель для исследования и оценки ситуации как есть. Информационная система рассматривается в контексте человеко-машинного взаимодействия. В своей работе о SSM Чекленд и Шоулз описывают семиступенчатую модель [206], где первые два шага состоят из выявления проблемной ситуации и анализа факторов, которые влияют на проблему. Тогда CISE может быть полезна для структурирования информации и для определения того, какие аспекты этого можно рассматривать как проблемные. То есть, наряду с инструментами, уже предоставленными в SSM, можно интерпретировать использование модели CISE следующим образом [293]: разработка методов оценки должна основываться на анализе статистических данных и выбросов, выясняя корреляцию факторов и итоговых значений.

Джоел Пальмиус в своей работе «Измерение и сравнение информационных систем» упоминает научную работу Ауво Финне, представляющую собой модель для обеспечения и оценки качества организационной ИС, и системы сбалансированных показателей Мартинсона. Также, при разработке модели, следует учитывать международные стандарты управления качеством: ИСО 9000 - 2015 – системы менеджмента качества [34]; ИСО/МЭК 25010 - 2015 – характеристики качества программного обеспечения [35]. Для анализа ключевых показателей, включающих аспекты взаимодействия человека с системы управления машиностроительным производством, необходимо использовать, шкалу Р. Лайкерта. Для этого задаются варианты ответов в диапазоне от минимума до максимума. В рамках данной работы будет проанализирована выборка из шестидесяти респондентов, пользующихся системы управления машиностроительным производством. Данные, полученные в ходе опроса респондентов, будут использованы для формирования оценки системы управления машиностроительным производством в разработанной модели. Подход к обработке данных, измеренных по шкале Р. Лайкерта описан в статье Л.И. Маруцак «Обработка данных, измеренных в шкале Лайкерта, с помощью теории нечетких множеств» [78].

В Приложении Б представлена классификация критериев оценки системы управления машиностроительным производством CISE.

Одной из основополагающих моделей оценки информационных систем является модель оценки У. Делона и Э. Маклина (DMSM - DeLone&McLesn Success Mode). Данная модель описывает отношения между шестью важными группами факторов, влияющих на «успех» ИС (рисунок 18) [210, 212]:

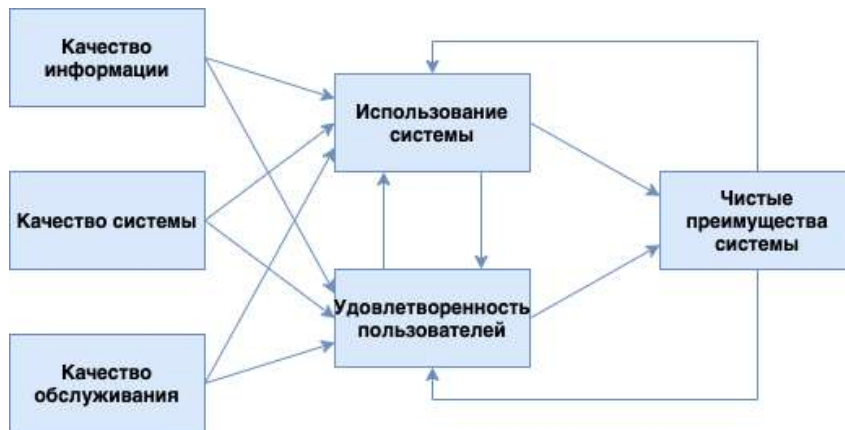


Рисунок 18 - Представление модели оценки ИС У. Делона и Э. Маклина

Группа факторов «Качество системы» представляет собой желаемые характеристики ИС и фокусируются на аспектах удобства использования и характеристиках производительности исследуемой системы и включает в себя следующие критерии: доступность, удобство, возможность настройки, точность данных, стоимость данных, легкость обучения, простота использования, эффективность, интеграция, интерактивность, навигация надежность, время отклика, точность системы, возможности системы, время выполнения запроса.

Группа факторов «Качество информации» представляет собой ожидаемые значения выходных данных ИС и включает в себя меры, фокусирующиеся на качестве информации, которую производит система, и ее полезности для пользователя: точность, достаточность, доступность, краткость, последовательность, формат, релевантность, надежность, объем, своевременность, понятность, уникальность, удобство использования, полезность.

Группа факторов «Качество обслуживания», включают оценку качества поддержки, которую пользователям оказывают сотрудники ИТ-отдела через

организацию обучения, горячей линии или службы поддержки. Одной из популярной оценки качества обслуживания в ИС является SERVQUAL (Service Quality – качество обслуживания), предложенной авторами [268], которая может быть дополнена следующими критериями: уверенность, эмпатия и гибкость при взаимодействии с клиентом, качество межличностного общения, качество организации внутренних процессов, обучение взаимодействию с ИС, надежность обслуживания, отзывчивость.

Группа факторов «Удовлетворенность пользователей» позволяет проводить измерение уровня удовлетворенности пользователя при взаимодействии с ИС. Измерение этой группы факторов особенно важно, когда использование ИС является регулярным и обязательным. Однако эти инструменты могут содержать не только измерение удовлетворенности пользователя, но и элементы оценки самой системы и качества обслуживания. Соответственно, были разработаны дополнительные элементы для измерения исключительно удовлетворенности пользователя ИС: адекватность, эффективность, положительная эмоциональная реакция при взаимодействии с системой.

Группа факторов «Использование системы» измеряет соответствие ожиданиям пользователей от использования информационной системой таких факторов как простота, скорость, полезность, и может быть дополнена, по мнению авторов концепции DMSM еще и факторами, оценивающими фактическое и ежедневное использование, частоту использования, намерение использовать повторно, характер использования, шаблоны навигации, количество посещений системы.

Группа факторов «Преимущества системы» представляет собой оценку вклада, который вносит информационная система при достижении поставленных целей для различных заинтересованных сторон. Эта группа включает в себя количественные финансовые показатели, такие как возврат инвестиций (ROI), доля рынка, стоимость, а также анализ производительности. Многие исследования, применяющие модель DMSM, измеряют выгоды от использования ИС на различных уровнях взаимодействия с использованием так факторов

как: осведомленность/интуитивное понимание, эффективность решения поставленных задач, производительность, простота использования, полезность, инновационность решений.

Несмотря на достаточно широкое и разностороннее описание ИС с помощью показателей, определенную трудность составляет процесс их оценки. Только 44 критерия (52,4%) можно измерить более или менее известными и распространенными методиками. Для остальных 47,6% показателей на сегодняшний день не существует единого подхода, который позволит объективно их оценить. Это критерии связаны с взаимодействием пользователя с системой такие как: сопричастность, удовлетворенность, уровень стресса, доступность функций, легкость поиска необходимой информации, легкость управления оборудованием, администрирование системы, понятность структур кода, использование стандартных компонентов кода, эффективность решения задач, ошибки из-за путанности в системе, обучаемость новых пользователей, скорость запоминания действий пользователя, быстрота, конгруэнтность, соответствие ожиданиям пользователя. Они составляют 20,2% от общего количества критериев и их можно охарактеризовать как когнитивные, т.е. отвечающие за познавательные процессы такие как: логика, внимание, память, принятия решений, уровень сензитивности (чувствительности).

2.4. Организация систем управления машиностроительным производством с использованием методов оптимизации

Применение методов поисковой оптимизации

Процесс проектирования системы управления предприятием стартует с этапа описания и анализа предметной области. Предметная область – это сегмент реального мира, имеющий существенное значение или прямое отношение к процессу функционирования программного продукта [3].

Анализ требует предварительной обработки информации, представленной в различных форматах, в том числе текстовом. На этом этапе текст преобразуется в перечень слов, после чего каждое слово приводится к определенной

форме, позволяющей распознавать идентичные слова, используемые в различных грамматических формах. По завершении первичной обработки приступают к анализу текста.

В контексте оценки эффективности SEO-оптимизации определяется стоимость привлечения целевого пользователя с учетом времени продвижения на целевые позиции и показателя конверсии [56, 4].

Дж. Ципф (G. Zipf) проводил исследования статистических свойств языка в текстовых документах и экспериментально продемонстрировал, что распределение слов в естественном языке подчиняется определенной закономерности. Эта закономерность известна как первый закон Ципфа. Его суть заключается в следующем: если для достаточно большого текста составить список всех употребленных слов и ранжировать их по убыванию частоты встречаемости, то произведение ранга любого слова на его частоту будет постоянной величиной [56, 309].

$$f * r = C,$$

где f – обозначает частоту встречаемости слова в тексте; r – ранг слова в списке; C – эмпирическая постоянная (коэффициент Ципфа). Для славянских языков, включая русский, коэффициент Ципфа составляет приблизительно 0,06–0,07.

Однако первый закон не принимает во внимание тот факт, что разные слова могут встречаться в тексте с одинаковой частотой. В связи с этим Ципф сформулировал еще одну закономерность – второй закон Ципфа, который гласит, что частота и количество слов, входящих в текст с данной частотой, также связаны подобным соотношением.

$$N(f) = \frac{B}{f^B},$$

где N_r – количество различных слов, каждое из которых используется в тексте r раз; C – константа нормирования.

При выполнении анализа текста вычисляются следующие параметры:

- общее число символов и слов;

- количество уникальных слов;
- число стоп-слов;
- частота употребления слов в тексте;
- метрики оценки качества текста (смысловая наполненность, академичность, лексическая повторяемость, естественность согласно законам Ципфа).

Стемминг – процедура нахождения основы (стема) для исходного слова. Этот метод применим исключительно к языкам с аффиксальным словоизменением. Аффикс – морфема, присоединяемая к корню для образования новых слов. Применение стемминга сопряжено с высоким риском ошибок [12].

Лемматизация – процесс приведения слова к лемме (нормальной, начальной, словарной форме). В русском языке это означает приведение существительного в любой грамматической форме к именительному падежу единственного числа. Алгоритм лемматизации предполагает замену окончания слова на суффикс или окончание его начальной формы [14].

Еще одним возможным способом анализа текста является морфологический анализ. Он состоит в приведении слова к его начальной форме и определении его морфологических характеристик (род, число, падеж и т.д.). Морфологический анализ достаточно трудный и требует наличия очень большой словарной базы [15].

Основными методами исследования факторов, относящихся к взаимодействию пользователя и системы, например таких как: Satisfaction (удовлетворенность), эргономичность, Usability (удобство использования) является:

- наблюдение за пользователями при выполнении задач,
- анкетирование после выполнения задания,
- использование панельных исследований,
- анализ отзывов.

Однако пользовательское поведение человека в большинстве случаев иррационально. Сделать выбор или принять решение, человека заставляет соб-

ственные подсознательные мотивации. Данный нерациональный аспект в поведении человека может быть понят только в результате привлечения знаний, полученных в науках о головном мозге, таких как нейробиологии, когнитивная психология, нейропсихология, психофизиология.

Перспективным является использование инструментов нейробиологических исследований для выявления причинно-следственных связей принятия решений и получения объективной информации о поведении человека при взаимодействии с СУ производством. Основными методами исследования является измерение и анализ физиологических реакций человека с использованием различных средств измерений (таблица 5). Когнитивно-поведенческие исследования могут быть использованы на любом этапе для тестирования взаимодействия человека и технической системы с целью более эффективного управления поведенческой моделью и совершенствования самой системы [129].

Таблица 5 – Соответствие измеряемого физиологического показателя и средством измерения

Измеряемый показатель человека	Средство измерения
Частота сердечных сокращений	Пульсометр
Частота дыхания	Датчик дыхания
Эклектическое сопротивление кожи	Датчик кожно-гальванической реакции
Движение глаз	Оборудование для айтрекинга
Активность мышц лица	Электронейромиограф
Активность мозга	Электроэнцефалограф

В предлагаемом способе исследования и оценки критериев СУ, отвечающих за когнитивные процессы восприятия пользователем системы, в дополнение к существующим методам оценки (наблюдение, анкетирование), используется еще и измерение физиологических реакций.

Методы комбинаторной оптимизации

Проблемы оптимизации СУ включают в себя несколько целевых функций, которые конфликтуют между собой и принятие решений должно осуществляться по нескольким критериям. В таких задачах многокритериальной оптимизации определено несколько целевых функций, которые оптимизируются одновременно. Решение таких задач как правило подразумевает использование значительных вычислительных ресурсов, что часто требует доступа к суперкомпьютерам. Кроме того, область оптимизации может быть большой, что делает всю оптимизацию процессом еще более вычислительно интенсивным и трудоемким. Поскольку принятие решений с учетом множества критериев, является NP-полной задачей (non-deterministic polynom), и поиск оптимального решения имеет полиномиальные по времени алгоритмы решения.

В случае только одной целевой функции решением является точка в пространстве поиска, так что целевая функция достигает своего оптимального (минимального или максимального) значения. Когда имеется более одной целевой функции, маловероятно, чтобы она имела одну точку, оптимальную для всех функций, особенно если существуют противоречивые цели. Вместо этого решением этих задач является набор парето-оптимальных точек. Каждая оптимальная по Парето точка не является доминантной по отношению к другой точке, потому что ценность одного объекта не может быть улучшена в дальнейшем без скарификации других объектов. Задача оптимизации с одной целью включает в себя одну целевую функцию и обычно приводит к единственному решению, которое называется оптимальным решением. С другой стороны, задача многоцелевой оптимизации рассматривает несколько конфликтующих целей одновременно. В таком случае обычно не существует единственного оптимального решения, а есть набор альтернатив с различными компромиссами, называемыми оптимальными по Парето решениями или недоминируемыми решениями. Несмотря на существование нескольких оптимальных по Парето решений, на практике обычно выбирается только одно из этих решений. Таким образом, по сравнению с одноцелевыми задачами оптимизации, в многокритериальной оптимизации есть как минимум две не менее

важные задачи: задача оптимизации для поиска оптимальных по Парето решений (с использованием компьютерной процедуры) и задача принятия решения для выбирая единственное наиболее предпочтительное решение.

Функции цели могут быть объединены в одну цель, часто с помощью взвешенной суммы целей. Это позволяет использовать методы одноцелевой оптимизации для оптимизации составной целевой функции. Однако для этого необходимо предварительно определить составную функцию, а процесс оптимизации генерирует единственный вектор в качестве оптимального решения [49]. В результате многоцелевая оптимизация лучше для решения реальных задач оптимизации.

Многоцелевая оптимизация состоит из трех этапов: построение модели, оптимизация и принятие решений (определение предпочтений). Сформулировать предпочтения без хорошего знания альтернатив сложно, и, следовательно, получаемый в результате оптимум может не соответствовать решению, которое пользователь выбрал бы из набора оптимальных по Парето решений. Результирующие множественные оптимальные по Парето решения можно проанализировать, чтобы узнать о взаимозависимостях между переменными решения, целями и ограничениями. Такие знания о взаимодействиях могут быть использованы для переопределения модели задачи оптимизации, чтобы получить решения, которые, с одной стороны, лучше соответствуют реальности, а с другой стороны, лучше удовлетворяют предпочтения целевой функции.

Область исследования проблем решения с несколькими конфликтующими целями известна как принятие решений по нескольким критериям и охватывает как дискретные проблемы (с конечным набором альтернатив), так и непрерывные задачи (многоцелевая оптимизация). Традиционно, в многокритериальной оптимизации методы математического программирования и принятия решений использовались взаимосвязанным образом, и конечная цель решения многоцелевой задачи оптимизации была охарактеризована как

поддержка в поиске решение, которое наилучшим образом соответствует предпочтениям целевой функции.

Многоцелевые задачи оптимизации имеют вид:

$$\min\{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})\}, \vec{x} \in S,$$

где функция $f_i: R^n \rightarrow R_i$ это k ($k \geq 2$) целевых функций [145]. Векторы $\vec{x}$ являются изображениями векторов решений и состоят из объективных (функциональных) значений $Z = f(\vec{x}) = \{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})\}^T$. Кроме того, изображение допустимой области в целевом пространстве называется допустимой целевой областью $Z = f(S)$.

При многоцелевой оптимизации векторы $\vec{x} \in S$ считаются оптимальными, если ни один из их компонентов не может быть улучшен без ухудшения по меньшей мере одного из других компонентов. Точнее, вектор решений называется оптимальным по Парето, если не существует другого $\vec{x} \in S$ такого, что $f_i(\vec{x}) \leq f_i(\vec{x}^*)$, для всех $i=1, \dots, k$ и $f_i(\vec{x}) < f_i(\vec{x}^*)$. Векторы оптимального решения по Парето можно обозначить через $P(S)$. Множество парето-оптимальных решений является подмножеством множества слабо Парето-оптимальные решения.

Вектор решений $x^* \in S$ слабо оптимален по Парето, если не существует другого $x^* \in S$ такого, что $f_i(\vec{x}) < f_i(\vec{x}^*)$ для всех $i = 1, \dots, k$.

Диапазоны оптимальных по Парето решений в возможной целевой области дают ценную информацию о рассматриваемой проблеме, если цель функции ограничена по допустимой области. Нижние границы оптимального множества Парето доступны в идеальном объективном векторе $z^* \in R^k$. На практике мы полагаем $z_i^{**} = z_i^* - \varepsilon$ для $i = 1, \dots, k$, где ε - небольшой положительный скаляр. Верхние границы оптимального множества Парето, то есть компоненты вектора цели z , как правило, трудно получить. Однако не существует конструктивного способа получения точного объективного вектора для нелинейных задач. Это может быть решено с использованием платежных матриц, но оценка может быть недостаточно точной и объективной.

Поскольку векторы не могут быть упорядочены полностью, все оптимальные по Парето решения могут рассматриваться как одинаково подходящие в математическом смысле, и нам требуется лицо, принимающее решения, чтобы определить наиболее предпочтительное из них.

Комбинаторная оптимизация является темой, которая заключается в нахождении оптимального решения из конечного множества объектов. Во многих таких проблемах исчерпывающий поиск не поддается исследованию. Он работает в области тех задач оптимизации, в которых набор возможных решений является дискретным или может быть сведен к дискретному, и в котором цель состоит в том, чтобы найти наилучшее решение [115, 91, 137].

Задача многокритериальной оптимизации представляет собой вектор: $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$, где любая компонента f_i является определенной целью лица принимающего решение, а необходимость достичь данной цели в математике формулирует условие максимизации (или минимизации) функции f_i на множестве X .

Наиболее гибким способом являются не критерии f_i , а («частные») отношения выбора f_i . Тем не менее, как определено, во многих значительных с практической точки зрения (то есть при отдельных «разумных» требованиях к f_i и X) имеется функция полезности u_i , которая адекватно отображает предоставленное «частное» отношение предпочтения: для всех $x', x'' \in X$ верна эквивалентность $x' \succ x'' \Leftrightarrow u_i(x') > u_i(x'')$. Полученные результаты представляют, что большое количество задач, в которых первоначально нет необходимости в максимизации (или минимизации) критериев, возможно, будут в теоретическом смысле, сведены к экстремальным задачам.

Исходя, из сказанного выше считаем, что лицо принимающее решение заинтересовано в приобретении больших значений любой компоненты f_i векторного критерия f . Рассматриваем многокритериальную задачу, необходимо ограничиться уровнем строгости выраженного допущения в виде, представленного выше. Тем не менее анализ указывает некоторую расплывчатость, неопределенность.

Переходим к оценкам, и рассмотрим каким образом задается бинарное отношение на множестве вероятных векторов $Y = f(X), Y \subset R^m$:

$$f(x') \succ_Y f(x'') \text{ для } x', x'' \in X.$$

Далее будем принимать выполненным следующее допущение, которое формулируется в терминах векторов критериального пространства.

Существует продолжение $\succ$ на все критериальное пространство R^m отношения $\succ_Y$, причем это продолжение $\succ$ является иррефлексивным и транзитивным отношением. Сущность этой аксиомы (не имея в виду иррефлексивность и транзитивность) подразумевает постулирование «расширенных» возможностей лица принимающего решение в сравнении с оценками предпочтений. Представляется три соотношения для любых двух векторов $y', y'' \in R^m$ в соответствии с решением:

- $y' \succ y''$
- $y'' \succ y'$
- не имеет места ни $y' \succ y''$, ни $y'' \succ y'$.

В задаче многокритериального выбора отношение предпочтения, соответствует критериям оптимальности, которые выражают интерес лица, принимающего решение. Таким образом они должны быть сопряжены между собой.

Любой из критериев $f_1, f_2, \dots, f_m$ согласован с отношением предпочтения $\succ$. Таким образом, заинтересованность лица, принимающего решения можно выразить через следующую аксиому Парето: Для всех пар решений $x', x'' \in X$, для которых имеет место неравенство $f_i(x') \geq f_i(x'')$, выполняется соотношение $x' \succ_X x''$. Справедливо для двух произвольных возможных решений $x', x'' \in X$, для $i=1, 2, \dots, m$, причем $f(x') \neq f(x'')$.

Если для отдельной пары вероятных решений имеет место неравенство $f_i(x') \geq f_i(x'')$, то исходя из аксиомы Парето первое решение будет предпочтительнее второго, то есть $x' \succ_X x''$.

Множество парето-оптимальных решений обозначается $P_f(X)$ и выражается следующим:

$$P_f(X) = \{x^* \in X \mid \text{не существует такого } x \in X, \text{ что } f(x) \geq f(x^*)\}.$$

Вектор $f(x^*)$ при Парето-оптимальном решении x^* называют парето-оптимальным вектором или оценкой решения x^* , а множество таких векторов

множеством парето-оптимальных векторов или оценок. Для данного множества следует использовать обозначение $P(Y)$:

$$P(Y) = f(P_f(X)) = \{f(x^*) \in Y \mid \text{при некотором } x^* \in P_f(X)\}, \quad \text{где } Y$$
 означает $Y = f(X)$.

Выражение $P(Y) = f(P_f(X))$ естественным образом связывает между собой множество парето-оптимальных решений и векторов. Таким образом, если знать множество парето-оптимальных решений, возможно нахождение соответствующего множества парето-оптимальных векторов. Справедливо и обратное, если мы имеем множество парето-оптимальных векторов $P(Y)$ по формуле $P_f(X) = f^{-1}(P(Y))$, где в правой части представлен прообраз множества $P(Y)$, можно попробовать построить соответствующее множество парето-оптимальных решений. Такие два множества в полной мере определяют друг друга, но попытки построения множества на основе другого, как правило влечет за собой математический трудности.

Определить множество парето-оптимальных векторов можно следующим эквивалентным множеством:

$$P(Y) = \{y^* \in Y \mid \text{не существует такого } y \in Y, \text{ что } y \geq y^*\}.$$

В случае конечного множества возможных векторов Y (в частности, если конечно множество возможных решений X) существует хотя бы одно парето-оптимальное решение и, соответственно, хотя бы один парето-оптимальный вектор, т.е. $P_f(X) \neq \emptyset, P(Y) \neq \emptyset$ [142, 146].

Оценка качества алгоритмов

Вычислительная сложность – понятие в информатике и теории алгоритмов, обозначающее функцию зависимости объема работы, которая выполняется некоторым алгоритмом, от размера входных данных. Объем работы обычно измеряется абстрактными понятиями времени и пространства, называемыми вычислительными ресурсами. Время определяется количеством элементарных шагов, необходимых для решения задачи, тогда как пространство определяется объемом памяти или места на носителе данных.

В частности, теория сложности вычислений определяет NP-полные задачи, которые недетерминированная машина Тьюринга может решить

за полиномиальное время, тогда как для детерминированной машины Тьюринга полиномиальный алгоритм неизвестен. Многие алгоритмы предлагают выбор между объемом памяти и скоростью [156].

Наиболее сложными частями программы обычно является выполнение циклов и вызов процедур. Если одна процедура вызывает другую, то необходимо более тщательно оценить сложность последней. Если в ней выполняется определенное число инструкций (например, вывод на печать), то на оценку сложности это практически не влияет. Если же в вызываемой процедуре выполняется $O(n)$ шагов, то функция может значительно усложнить алгоритм. Если же процедура вызывается внутри цикла, то влияние может быть намного больше.

Необходимо провести сравнительный анализ точного и эвристических алгоритмов, представленных методом ветвей и границ, генетическим и муравьиным алгоритмами, методом динамического программирования, алгоритмом имитации отжига, методом ближайшего соседа для поиска оптимального решения задачи коммивояжера [155]. Целью является определение времени работы, качество полученного решения и объема памяти, необходимого для работы программы, при использовании метода ветвей и границ и эволюционных эвристических алгоритмов. Также определяется наиболее целесообразный из перечисленных методов для применения в заданных условиях.

Поиск оптимального маршрута сводится к решению задачи коммивояжера, то есть к поиску кратчайшего гамильтонова цикла в графе. Данная задача является задачей комбинаторной оптимизации и заключается в поиске кратчайшего маршрута в полном взвешенном графе G с N узлами и $N(N - 1)$ ребрами, так что начальный и конечный узлы идентичны, а все остальные узлы посещаются единожды [132].

Матрицу расстояний можно представить в виде полного взвешенного графа $G(X, V)$ порядка N , где $N = \{x_1, x_2 \dots x_N\}$ – множество вершин, а $V \subseteq X \times X$ – множество ребер. Оптимальным маршрутом в таком случае будет

Гамильтонов цикл, имеющий наименьший суммарный вес входящих в него ребер.

Формально описать задачу можно следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1; j = 1, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1; i = 1, \dots, m$$

$$x_{ij} \geq 0 \{i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N}\}$$

где d_{ij} – расстояние между пунктами i и j , а x_{ij} обозначает двоичные переменные:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если коммивояжер переправляется из пункта } i \text{ в пункт } j, \\ 0, & \text{если коммивояжер не переправляется из пункта } i \text{ в пункт } j \end{cases}$$

Поскольку переменные x_{ij} могут принимать только значение от 0 или 1, эта проблема имеет конечное число решений.

Для решения задачи коммивояжера необходимо найти переменные $\{i = \overline{1, m}; j = N\}$, удовлетворяющие системе ограничений, условиям неотрицательности и обеспечивающие минимум целевой функции.

Данная задача является NP-трудной, ее решение зависит от количества вершин N , т.к. число возможных маршрутов равно числу способов упорядочения вершин графа ($N!$). Решение задачи коммивояжера требует использования эффективных алгоритмов, способных за адекватное время найти приближенный к оптимальному маршрут.

Задача коммивояжера является одной и наиболее известных NP-сложных задач, для ее решения не существует точного алгоритма. Существуют разные способы классификации алгоритмов, но основной характеристикой является способность найти точное решение [230].

Для поиска оптимального решения в задаче коммивояжера время является экспоненциальным. Исходя из этого, для решения таких задач могут использоваться эвристические методы, главным преимуществом которых является возможность ограничить перебор вариантов решения, т.е. сокращать число вариантов, изучаемых перед выбором окончательного решения.

Эвристические методы обычно существенно быстрее точных, но они не позволяют гарантировать оптимальность найденного решения. Точные методы, в свою очередь, не только находят некоторое решение, но и доказывают его оптимальность. В процессе проведения экспериментов результаты, полученные точным методом, будут считаться эталонными ввиду обеспечения наибольшей точности.

Рассмотрены оба варианта классификации методов решения задачи коммивояжера: точный метод реализуется через метод ветвей и границ и методом динамического программирования, эвристический метод - через генетический алгоритм, муравьиный алгоритмы, алгоритм имитации отжига и метод ближайшего соседа. Основной задачей данной работы является сравнение разных методов и выбор оптимального для решения поставленной задачи.

Основной идеей *метода ветвей и границ* [184, 97, 261] (далее - МВГ), в отличие от метода полного перебора, является избавление от подмножества решений, которые заведомо не могут содержать оптимальное решение [66]. Частично построенные маршруты отсекаются в том случае, если их оценка больше или равна длине ранее построенного полного наилучшего маршрута. При поиске оптимального решения строится бинарное дерево. На каждом шаге метода производится анализ элементов подмножества и оценка текущего маршрута с целью выявления оптимального решения. Метод является развитием метода полного перебора, в отличие от последнего — с отсеком подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных решений.

Основным преимуществом МВГ является то, что накопление ошибок менее значительное, чем у других алгоритмов, в силу того что решение идет по разным ветвям. Более того, при принудительной остановке процесса решения

высока вероятность получения целочисленного результата, но без установления его оптимальности.

Значительным недостатком МВГ является отсутствие признака оптимальности. Оптимальное решение может быть получено задолго до остановки алгоритма, но обнаружить это в общем случае нельзя. Оптимальность устанавливается только по исчерпанию списка задач.

Решение задачи коммивояжера данным алгоритмом начинается с построения матрицы расстояний G_0 размерности $N \times N$, в которой исходными данными будут являться расстояния между пунктами C_{ij} . Далее находятся минимальные значения по строкам (d_i) и столбцам (d_j), проводится редукция матрицы по строкам (1) и столбцам (2):

$$C_{ij} = C_{ij} - d_i \quad (1)$$

$$C_{ij} = C_{ij} - d_j \quad (2)$$

После редукции находится корневая нижняя граница H_0 . Для этого вычисляется сумма констант приведения по формуле (3). Одновременно с этим начинается построение дерева решений – графа, где:

- вершины – это ключевые решения по включению / невключению в итоговый маршрут рассматриваемых отрезков пути;
- ветви – ребра альтернативных вариантов решения;
- корень – локальная нижняя граница H_k , она же – минимальная длина маршрута.

$$H_k = \sum_{i=1}^N d_i + \sum_{j=1}^N d_j \quad (3)$$

Далее вычисляются оценки нулевых клеток приведенной матрицы по формуле (4) и среди них выбирается максимальная оценка Q .

$$Q_{ij} = \min(d_i) + \min(d_j), \quad (4)$$

где Q_{ij} – это штрафы за неиспользование тех отрезков маршрута, которым соответствуют нулевые клетки.

Матрица редуцируется в соответствии с клеткой, имеющей оценку Q . Одновременно с получением матрицы происходит ветвление дерева решений: первая ветвь – это решения, включенные в маршрут, а вторая – решения, не включенные в маршрут. Для каждой ветви вычисляется новая локальная нижняя граница по формуле (5).

$$H_k = \begin{cases} H_{k-1} + \sum_{i=1}^N d_i + \sum_{j=1}^N d_j - \text{для первой ветви,} \\ H_{k-1} + Q_{ij} - \text{для второй ветви} \end{cases} \quad (5)$$

Далее производится выбор:

1. либо выбирается ветвь, которая включает минимальную нижнюю локальную границу;
2. либо выбирается ветвь, которая не включает минимальную нижнюю локальную границу, искомый отрезок исключается из маршрута.

Ветвление дерева продолжается, пока не будет найдено оптимальное решение, включающее в себя все точки из начальной матрицы расстояний. Его длина вычисляется как сумма всех C_{ij} , включенных в маршрут.

Блок-схема МВГ, отражающая процесс его реализации, представлена на рисунке 19.

Целью решения задачи коммивояжера является поиск гамильтонова цикла минимальной длины среди n городов. В свете вышеизложенного, *метод динамического программирования* (далее – МДП) рассматривается как n -шаговый процесс, когда на каждом этапе необходимо построить оптимальный маршрут объезда оставшихся пунктов назначения в зависимости от текущего положения [65, 58, 161]. Далее будет представлен алгоритм решения задачи коммивояжера с использованием МДП в общем виде для n точек.

Согласно идее Р. Беллмана [204], наименьший по стоимости маршрут будет найден в том случае, когда на последнем n -ом шаге будет найдено решение $C(n, i_1, i_2, i_3, \dots, i_{n-1})$. Эта запись интерпретируется как оптимальная стоимость объезда всех $(n - 1)$ городов из города n .

Далее происходит дробление исходной задачи на подзадачи. Так, на следующем этапе необходимо найти оптимальный маршрут из пункта 1 до пунктов $i_2, i_3, i_4, \dots, i_{n-1}$, из пункта 2 до пунктов $i_1, i_3, i_4, \dots, i_{n-1}$ и так далее. Функции Беллмана (6) будут равны:

$$\begin{aligned}
 &C(1, i_2, i_3, i_4, \dots, i_{n-1}) \\
 &C(2, i_1, i_3, i_4, \dots, i_{n-1}) \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &C(n-1, i_1, i_2, i_3, \dots, i_{n-2})
 \end{aligned} \tag{6}$$

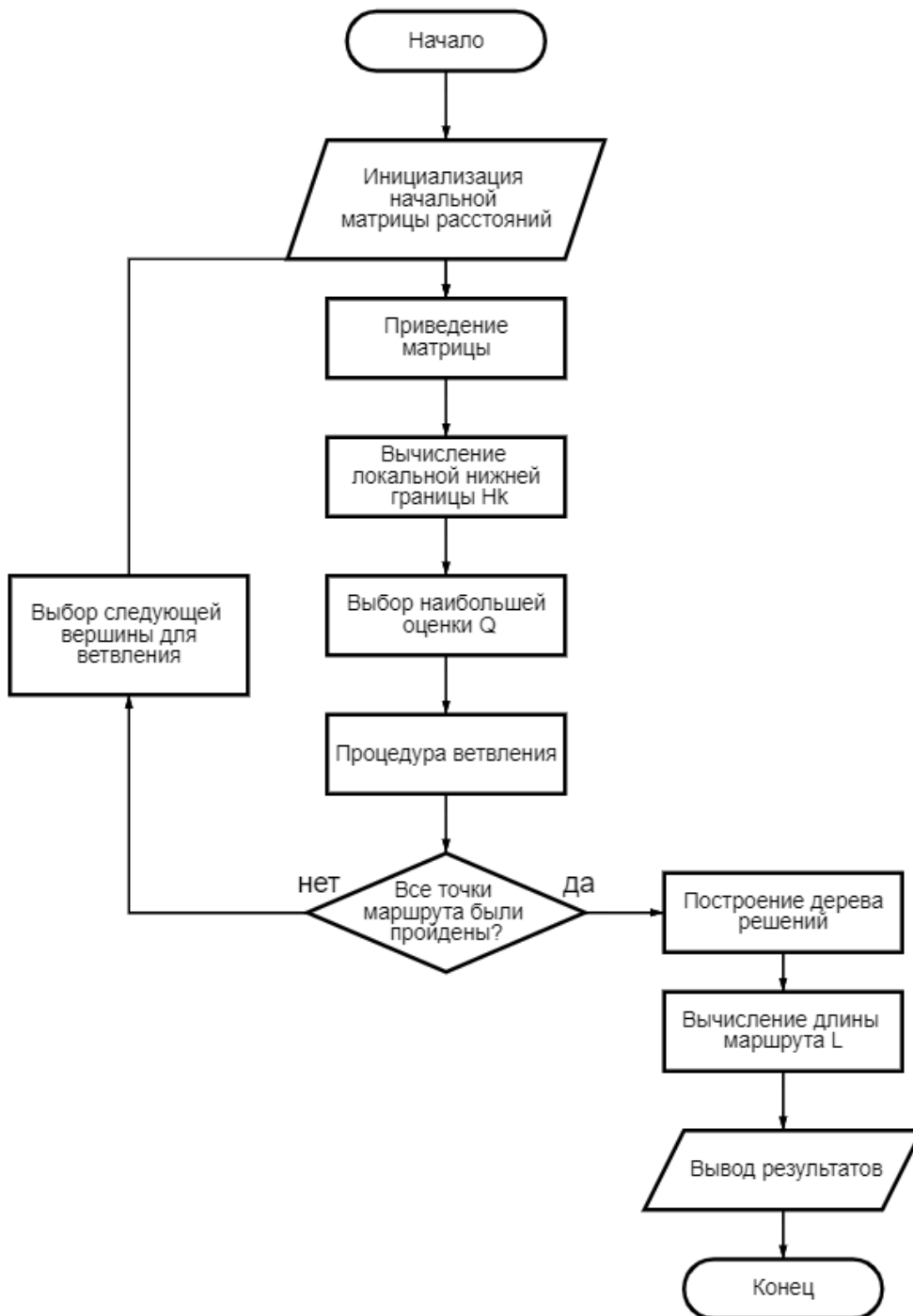


Рисунок 19 - Блок-схема МВГ

Таким образом для функции Беллмана на n -ом этапе получаем выражение (7):

$$C(n, i_1, i_2, i_3, \dots, i_{n-1}) = \min \left\{ \begin{array}{l} [a_{n1} + C(1, i_2, i_3, i_4, \dots, i_{n-1})], \\ [a_{n2} + C(2, i_2, i_3, i_4, \dots, i_{n-1})], \\ \dots, \\ [a_{nn-1} + C(n-1, i_1, i_2, i_3, \dots, i_{n-2})] \end{array} \right\} \quad (7)$$

где a_{n1} - стоимость перехода из города n до пункта 1.

Дальнейшая декомпозиция подобным образом позволит получить формулы Беллмана для состояний 2, 3, 4, 5 и так далее. В конечном счете мы приходим к $n - 1!$ формулам следующего вида (8):

$$\begin{aligned}
 C(1, i_2) &= a_{12} + C(2, i_n) \\
 C(1, i_3) &= a_{13} + C(3, i_n) \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 C(1, i_{n-1}) &= a_{1n-1} + C(n-1, i_n) \\
 C(2, i_1) &= a_{21} + C(1, i_n) \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 C(n-1, i_{n-3}) &= a_{n-1n-3} + C(n-3, i_n) \\
 C(n-1, i_{n-2}) &= a_{n-1n-2} + C(n-2, i_n)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Поскольку выражения типа $C(2, i_n)$ является расстоянием между городами 2 и n , значение которого является исходным данным задачи коммивояжера, то решение подобных выражений с последующим нахождением оптимального маршрута не вызывает трудностей.

Генетический алгоритм [188, 69] (далее - ГА) представляет собой эвристический алгоритм, основанный на эволюционном признаке выживания наиболее приспособленных особей. Данный алгоритм применяет методы, аналогичные естественному отбору в природе, например, скрещивание, мутация, кроссинговер. Наиболее приспособленные особи имеют выше шансы на выживание и продолжение рода, и, как следствие, потомство в среднем будет более приспособленным, нежели предыдущее поколение [164].

На начальном этапе случайным образом создается некоторое количество начальных векторов, называемых «начальной популяцией». Далее к маршрутам множества применяются операции скрещивания и мутации, целью кото-

рых является создание нового “поколения”. Исключающим фактором попадания в локальный экстремум является тот факт, что ГА использует одновременно несколько точек поискового пространства.

Достоинствами ГА служат большое число свободных параметров, позволяющих эффективно встраивать эвристики, реализация отбора лучших особей методом градиентного спуска и возможность распараллеливания алгоритма.

В качестве недостатка ГА выступает недоказанность сходимости.

Определим основные понятия, используемые в ГА:

- особь - искомый оптимальный путь $S_{\text{опт}}$;
- популяция - набор всех маршрутов $f(x) = F(S_1, S_2, \dots, S_k)$;
- хромосома - любой маршрут S_k ;
- гены – точки на карте от A до k , которые проходит робот-курьер;

Реализация ГА начинается с создания первой матрицы маршрутов – начальной популяции. Далее генерируются n маршрутов путем перемешивания генов, рассчитывается приспособленность (длина маршрута) каждой хромосомы. Выбираются два родителя (маршрута) и проводится процесс размножения.

При размножении сперва генерируется точка разрыва, с которой начинается процесс скрещивания, после чего формируются первый и второй потомки.

Пусть хромосомы первого родителя будут $X = \{x_i, i = \overline{1, L}\}$, а хромосомы второго - $Y = \{y_i, i = \overline{1, L}\}$. Если точка разрыва будет перед n -ым геном, то до скрещивания хромосомы обоих родителей будут выглядеть следующим образом:

$X_1, X_2, X_3 \dots X_{n-1}, X_n, X_{n+1} \dots X_L$ – гены I родителя,

$Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_{n-1}, Y_n, Y_{n+1} \dots Y_L$ – гены II родителя.

Первый потомок формируется использованием генов I родителя до точки разрыва и генов II родителя после нее:

$X_1, X_2, X_3 \dots X_{n-1}, Y_n, Y_{n+1} \dots Y_L$ – гены I потомка.

Второй потомок формируется аналогичным образом:

$Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_{n-1}, X_n, X_{n+1} \dots X_L$ – гены II потомка.

Процесс мутации проводится с помощью обмена между случайными генами: выбираются два случайных гена и меняются местами. Операция выполняется для обоих потомков:

$X_1, X_2, Y_n \dots X_{n-1}, X_3, Y_{n+1} \dots Y_L$ – гены I потомка после мутации,

$Y_1, X_n, Y_3 \dots Y_{n-1}, Y_2, X_{n+1} \dots X_L$ – гены II потомка после мутации.

Выжившие потомки добавляются в популяцию, отсортированную по возрастанию приспособленности хромосом. Из популяции удаляются наименее приспособленные особи в размере $(K_i - K_{i-1})$, где K_i – размер текущей популяции, K_{i-1} – размер старой популяции.

Процессы размножения, скрещивания, мутации и сортировки популяции повторяются до тех пор, пока не сменят друг друга заданное число поколений и не будет найдена лучшая особь (искомый путь).

Блок-схема, описывающая ГА, представлена на рисунке 20.

Муравьиный алгоритм [277, 299, 199, 264, 111] (далее - МА) – один из эффективных алгоритмов для нахождения приближенных решений задачи коммивояжера. Также МА подходит для нахождения решения аналогичных задач поиска маршрутов на графах. Основой для данного алгоритма служит коллективная адаптация внутри колонии муравьев (агентов). МА основан на низкоуровневом взаимодействии простых агентов единой системы. Муравей опирается на опыт других муравьев посредством феромона – вещества, оставляемого муравьями на пройденном пути, концентрация которого определяет желание особи выбрать тот или иной путь. Стоит отметить случайный характер движения агента системы при выборе пути [231] на начальном этапе. Данное явление приводит к попаданию в локальный оптимум.

В качестве основных достоинств МА можно отметить:

- сравнительную эффективность для решения оптимизационных задач и задач размещения;
- возможность использования в динамических приложениях;

- использование памяти обо всей колонии, вместо памяти только о предыдущем поколении, ввиду чего данный алгоритм менее подвержен неоптимальным начальным решениям (в сравнении с ГА).

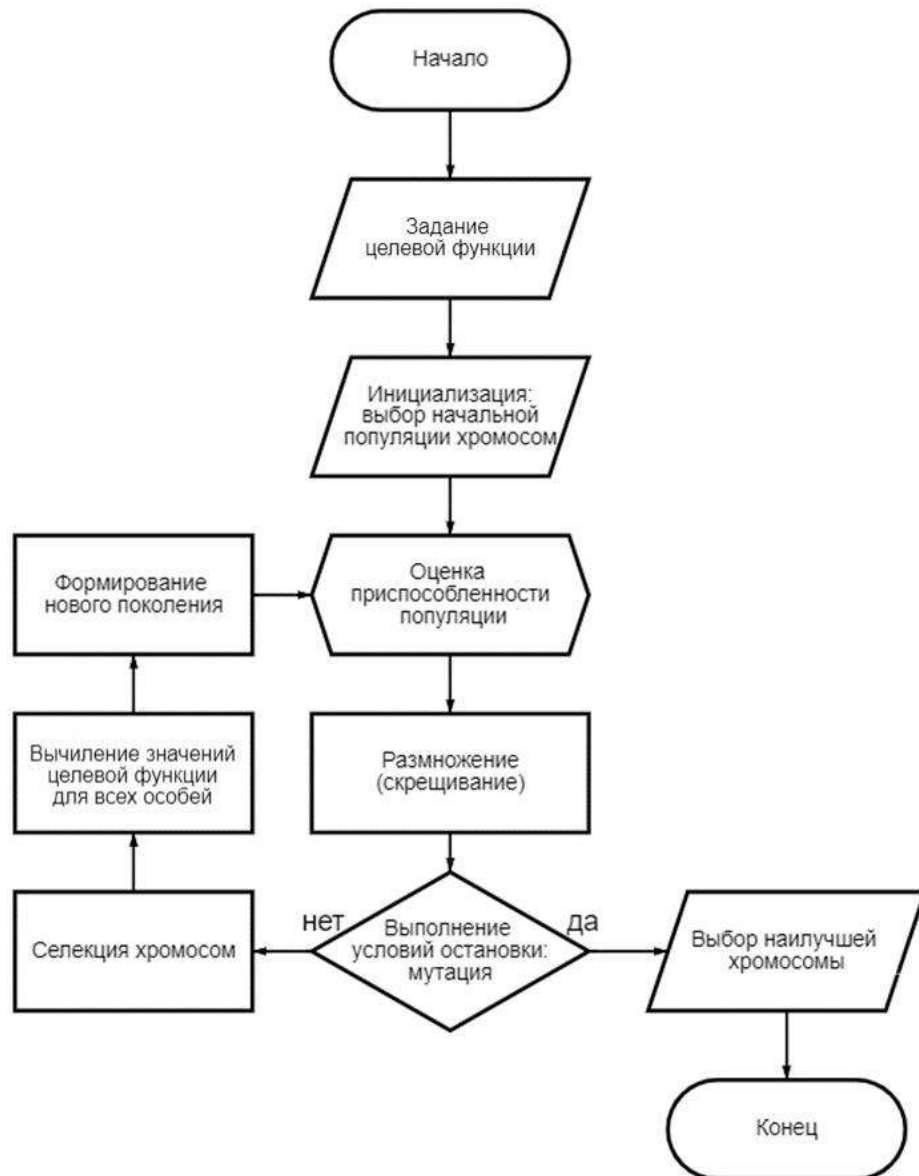


Рисунок 20 - Блок-схема ГА

Несмотря на перечисленные преимущества, МА имеет следующие недостатки:

- затрудненный теоретический анализ ввиду того, что распределение вероятностей меняется при итерациях, а время сходимости не определено;
- значительная зависимость от настроечных параметров.

Настройечными параметрами для МА являются коэффициенты α , определяющие, насколько сильно количество феромона оказывает влияние на выбор муравья, и β , определяющий, насколько сильно муравей при принятии решения будет ориентироваться на близость следующей вершины, а также m – число муравьев в колонии.

Вероятность того, что муравей k перейдет из пункта i в пункт j , определяется отношением его желания совершить переход $i \rightarrow j$ $(\tau_{ij,k})^\alpha * (\eta_{ij,k})^\beta$ к сумме его желаний перейти в любую доступную точку, что отражено в формуле (9).

$$P_{ij,k} = \frac{(\tau_{ij,k})^\alpha * (\eta_{ij,k})^\beta}{\sum_{m \in N} (\tau_{ij,k})^\alpha * (\eta_{ij,k})^\beta}, \quad (9)$$

где $P_{ij,k}$ – вероятность перехода из пункта i в пункт j ; k – индекс муравья; $\tau_{ij,k}$ – начальное количество феромона, откладываемого муравьем k при переходе; $\eta_{ij,k}$ – близость пункта i к пункту j ; α и β – настройечные коэффициенты; m – число муравьев в колонии; N – множество доступных пунктов.

Далее случайным образом определяется вероятность. Пункт выбирается исходя из того, в какой диапазон попало значение вероятности.

Пройдя в выбранный пункт, муравей отложит некоторое количество феромона на пути к нему, определяемое по формуле (10). В первом случае выбранная дорога попадает в итоговый маршрут, во втором – не попадает [71].

$$\tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & \text{если } (i, j) \in T_k(t); \\ 0 & \text{в ином случае.} \end{cases} \quad (10)$$

Стоит учитывать, что феромон на протяжении всего времени испаряется по закону, определяемому формулой (11).

$$\Delta\tau_{ij}(t+1) = (1-p) * \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t) \quad (11)$$

Блок-схема, описывающая работу МА, представлена на рисунке 21.

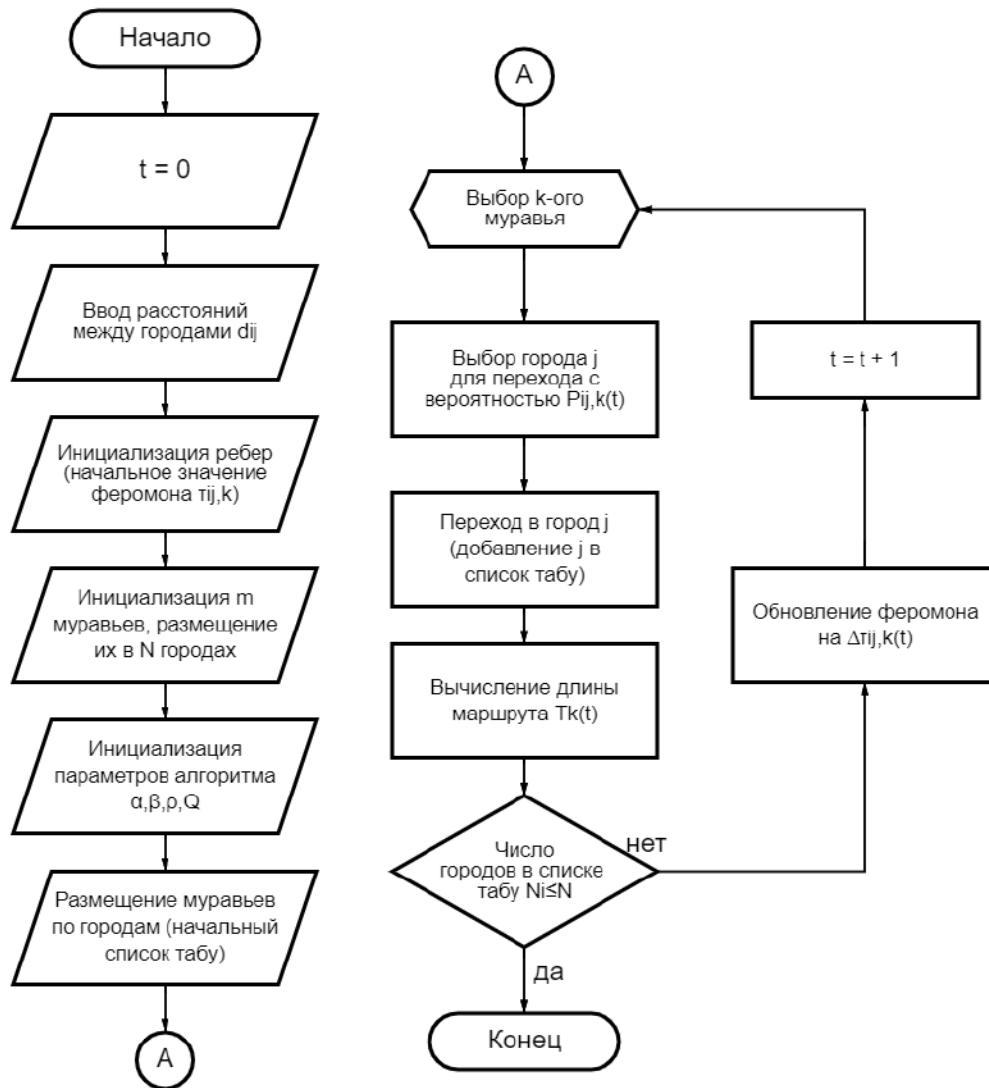


Рисунок 21 – Блок-схема МА

Алгоритм имитации отжига (далее – АИО) вдохновлен физическим процессом, наблюдаемым при отжиге металла в металлургии, суть которого заключается в постепенном охлаждении материала для увеличения его прочности, а также уменьшения дефектов [218, 308, 22]. Изначально случайным образом выбирается некоторый гамильтонов цикл. Далее на каждом последующем этапе находится случайное близкое решение. В том случае, если найденное решение лучше предыдущего, оно заменяет найденное ранее. Однако, в том случае, когда новое решение хуже предыдущего, оно может быть выбрано на замену найденному результату с некоторой вероятностью, которая

зависит от температуры. По аналогии с отжигом металла в металлургии температура с каждой новой итерацией становится ниже, что закономерно ведет к уменьшению вероятности выбора менее предпочтительного варианта в качестве опорного.

Обозначения, необходимые для описания АИО, представлены ниже:

- S – множество состояний системы (вариантов маршрута);
- s_i – состояние системы на i -том шаге алгоритма, $s_i \in S$;
- t_i – температура на i -том шаге алгоритма.

АИО реализуется с помощью трех основных функций:

$E : S \rightarrow R$ – функция энергии (то, что требуется оптимизировать), где R – множество действительных чисел (как иррациональных, так и рациональных);

$T : S \rightarrow R$ – функция изменения температуры с течением времени (обязательно убывающая);

$F : S \rightarrow S$ – функция, порождающая новое состояние системы.

Функция энергии E ставит каждому решению соответствующее число по определенному правилу.

Функция изменения температуры T каждой итерации i присваивает температуру. Эта функция определяет, как долго будет работать алгоритм. Если T будет линейной функцией, например, $T(i) = t_1 * \alpha^i$, то время работы будет относительно большим. В случае степенной функции, например, $T(i) = \frac{t_1}{\alpha^i}$, алгоритм будет работать быстро, однако гарантия нахождения глобального, а не локального минимума, будет крайне низкой.

Функция F на основе предыдущего состояния порождает новое состояние-кандидат, в которое система может перейти, а может и отбросить. Обозначим его S_c .

Входными данными для АИО являются t_{min} и t_{max} – минимальная (конечная) и максимальная (начальная) температуры системы соответственно.

Случайной генерацией выбирается начальное состояние системы s_1 с температурой $t_1 = t_{max}$. Пока не будет найдена минимальная температура $t_i = t_{min}$ (т.е. пока $t_i > t_{min}$), будут повторяться следующие шаги:

- 1) с помощью функции F генерируется новое состояние системы: $s_c = F(s_{i-1})$;
- 2) определяется изменение энергии системы: $\Delta E = E(s_c) - E(s_{i-1})$;
- если энергия уменьшилась или осталась неизменной, $\Delta E \leq 0$, тогда состояние-кандидат принимается, и система точно переходит в него: $s_i = s_c$;
- если энергия увеличилась, $\Delta E > 0$, тогда вычисляется вероятность перехода системы в это состояние: $P(\Delta E) = e^{\frac{-\Delta E}{t_i}}$. Переход осуществляется, если случайно сгенерированное число будет располагаться на числовой оси справа от вычисленной $P(\Delta E)$ (рисунок 22);
- 3) температура системы понижается: $t_{i+1} = T(i)$;
- 4) возвращается последнее состояние системы s_{best} .



Рисунок 22 – Принцип осуществления перехода с вероятностью P

В процессе выполнения алгоритма запоминается наилучшее состояние системы s_{best} , и каждое i -тое состояние сравнивается с наилучшим. Если $E(s_i) < E(s_{best})$, то $s_{best} = s_i$.

Блок-схема, описывающая работу АИО, представлена на рисунке 23.

Метод ближайшего соседа (далее – МБС) относится к жадным алгоритмам, которые подразумевают выбор локально оптимального решения [144]. Такой подход лег в основу многих эвристических методов. Применительно к задаче коммивояжера, на каждом этапе решения выбирается тот из еще не выбранных городов, который наиболее близко расположен к последнему выбранному. Метод ближайшего соседа, как и все эвристические методы, могут выдавать неоптимальное решение, что демонстрирует тот факт, что для любого

количества пунктов назначения, более трех, возможно найти такое расположение пунктов, что рассматриваемый метод будет приводить к наихудшему из возможных результатов (рисунок 24).

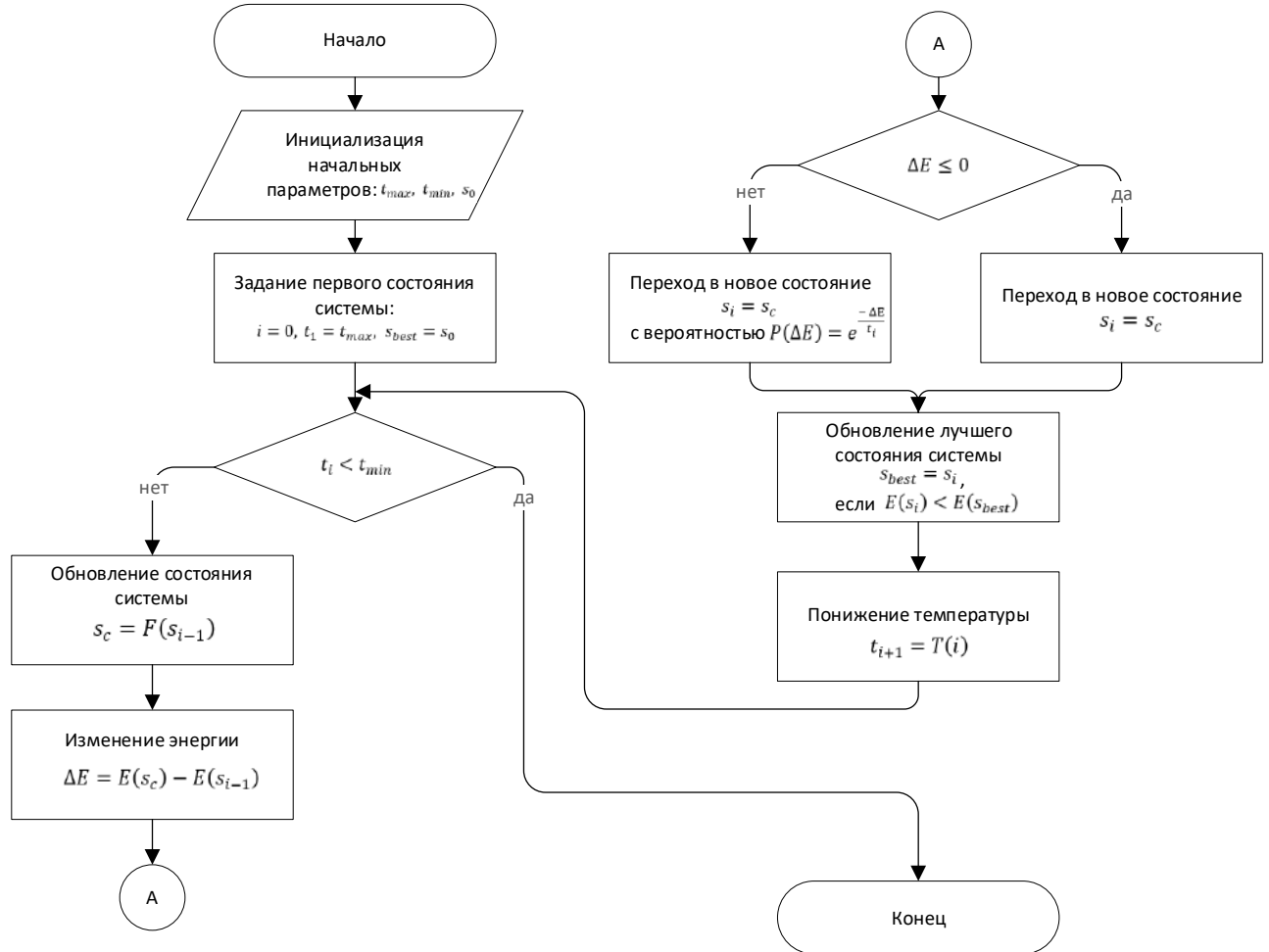


Рисунок 23 - Блок-схема АИО

2.5. Модель оценки показателей систем управления машиностроительным производством методами нечеткой логики

Теория нечетких множеств – это эффективный метод моделирования в условиях неопределенности. Когда множество четко определено, могут быть применены правила булевого четкого логического вывода, однако, в случае отсутствия четкости, их применять нельзя. В таком случае может быть применен нечеткий логический вывод. Нечеткий логический вывод – это аппроксимация зависимости «вход – выход» на основе лингвистических высказываний <Если – то> и логических операций над нечеткими множествами. Данный вывод применяется при моделировании объектов с непрерывным и дискретным

выходом. Объекты с дискретным выходом соответствуют задачам классификации в технической диагностике, в распознавании образов, в ситуационном управлении и принятии решений в других областях (где x_i – входные параметры, y – выходные параметры, d_j - заключение) [169].

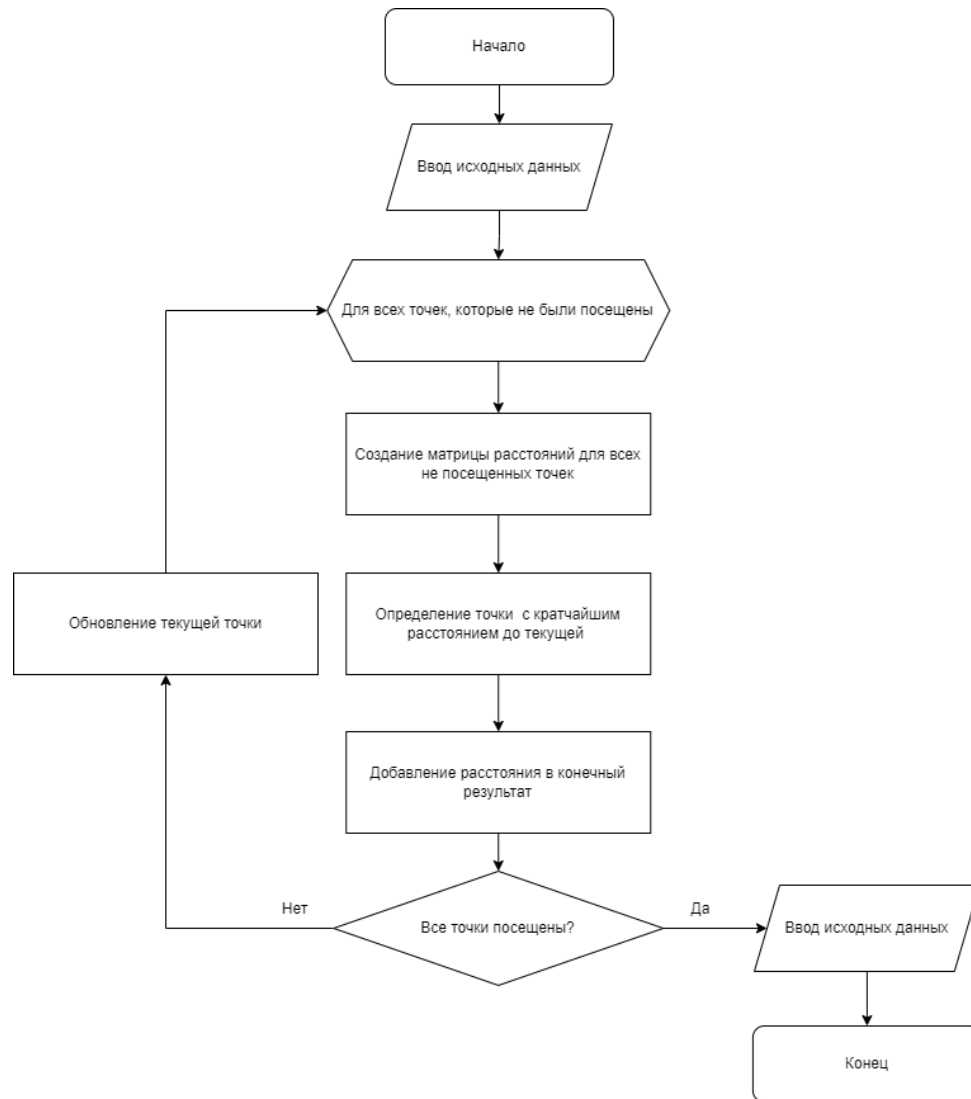


Рисунок 24 - Блок-схема МБС

Систему управления машиностроительным производством следует моделировать как объект с дискретным выходом, так как результаты работы направлены на получение вывода о качестве системы.

Ниже приведена типовая структура нечеткого логического вывода (рисунок 25).

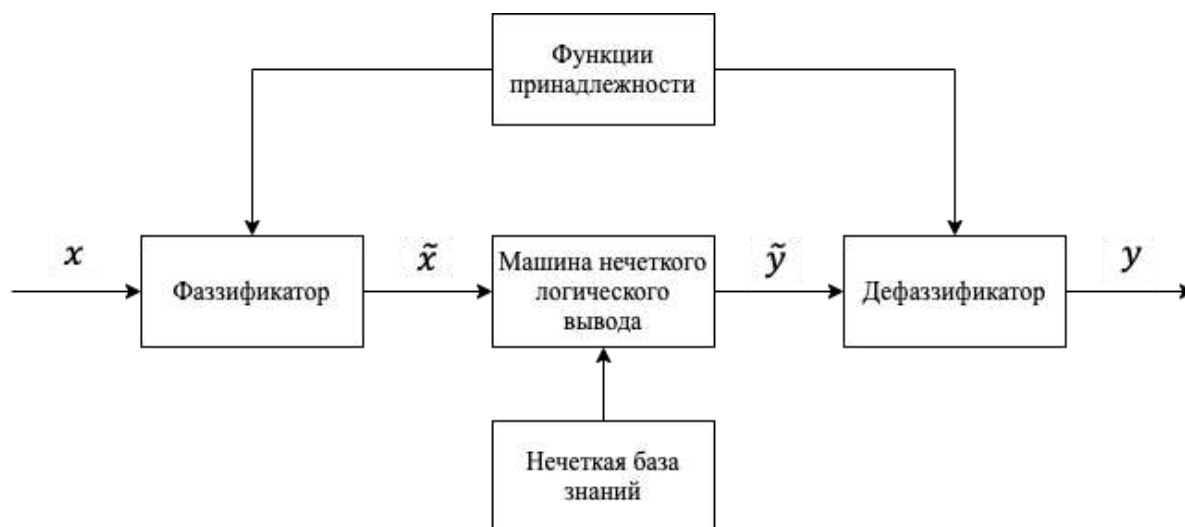


Рисунок 25 - Структура нечеткого логического вывода

Фаззификатор – преобразует фиксированный вектор критериев оценки ИС X в вектор нечетких множеств $\tilde{X}$. Стоит обратить внимание, что фаззификатор применяется только для четких параметров.

Нечеткая база знаний – содержит информацию о зависимости $Y = f(X)$ в виде лингвистических правил <Если – то>. Структура НЛВ x является посылкой правила (антецедентом), а y заключением правила (консеквентом).

Функция принадлежности – используется для представления лингвистических термов (T) в виде нечетких множеств. Терм-множества характеризуются функциями принадлежности, график которых может быть построен.

Аппарат нечеткого логического вывода – на основании правил базы знаний определяет значения выходной переменной в виде нечеткого множества $\tilde{Y}$, соответствующего нечетким значениям входной переменной ($\tilde{X}$).

Дефаззификатор – преобразует выходное нечеткое множество в четкое число Y .

Основой всех алгоритмов нечеткого вывода является композиционное правило Заде. Основные алгоритмы нечеткого вывода представлены ниже:

- алгоритм Мамдани;
- алгоритм Сугено;
- алгоритм вывода по синглтонной базе знаний;
- алгоритм вывода для задач классификации.

Алгоритм Мамадани примечателен тем, что он работает по принципу «черного ящика». Алгоритм используется для многомерных зависимостей «входы – выходы». Используется в тех случаях, когда нечеткие переменные на входе (после фазификации) связаны между собой и на выходе из их совокупности получается нечеткое заключение [39].

Нечеткий вывод Мамдани выполняется по следующей базе знаний, формула (12):

$$(x_1 = \widetilde{a}_{1j} \Theta_j x_2 = \widetilde{a}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j x_n = \widetilde{a}_{nj} \text{ с весом } w_j) \Rightarrow y = \widetilde{d}_j, j = \overline{1, m}, \quad (12)$$

где $\widetilde{a}_{ij}$ – нечеткий терм, которым оценивается переменная x_i в j -м правиле, $\widetilde{d}_j$ – заключение j -го правила, m – количество правил в базе знаний, Θ_j – логическая операция в базе знаний, связывающая фрагменты антецедента j -го правила (И, ИЛИ), $\Rightarrow$ – нечеткая импликация, w_j – весовой коэффициент j -го правила, учитывающий меру уверенности ($w_j \in [0,1]$).

Нечеткий вывод Сугено выполняется по следующей базе знаний, в соответствии с формулой (13):

$$(x_1 = \widetilde{a}_{1j} \Theta_j x_2 = \widetilde{a}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j x_n = \widetilde{a}_{nj}) \Rightarrow y = b_{j0} + b_{j1}x_1 + b_{j2}x_2 + \dots + b_{jn}x_n, j = \overline{1, m}, \quad (13)$$

где $b_{j0}, b_{j1}, \dots, b_{jn}$ – некоторые действительные числа.

База знаний Сугено схожа с базой знаний Мамдани, за исключением заключений правил, которые задаются не нечеткими термами, а линейной функцией от входов, в соответствии с формулой (14):

$$d_j = b_{j0} + \sum_{i=\overline{1, n}} b_{ji}x_i \quad (14)$$

Правила в данном алгоритме являются переключателем с одного линейного закона «входы – выход» на другой, тоже линейный.

Нечеткая база знаний, в которой посылки заданы нечеткими множествами, а заключения правил – четкими числами, формула (15):

$$(x_1 = \widetilde{a}_{1j} \Theta_j x_2 = \widetilde{a}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j x_n = \widetilde{a}_{nj}) \Rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}, \quad (15)$$

где d_j – некоторые действительные числа.

Синглтонная база знаний представляет собой частный случай базы знаний Мамдани. Четкое число d_j , задающее заключение j -го правила, может быть рассмотрено как нечеткое множество с синглтонной функцией принадлежности. Так же она может трактоваться как частный случай базы знаний Сугено, эквивалента базе знаний Сугено нулевого порядка, в которой коэффициенты при входных переменных в линейных законах «входы-выход» равны нулю.

Задача классификации состоит в отнесении объекта, заданного вектором информативных признаков $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ к одному из наперед описанных классов $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$. Классификация соответствует отображению вида, формула (16):

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow y \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\} \quad (16)$$

Для классификации необходима нечеткая база знаний вида, формула (17):

ЕСЛИ

$$\begin{aligned} & x_1 = a_{1,j1} \text{ И } x_2 = a_{2,j1} \text{ И } \dots \text{ И } x_n = a_{n,j1}, \text{ с весом } w_{j1} \\ \text{ИЛИ} \quad & x_1 = a_{1,j2} \text{ И } x_2 = a_{2,j2} \text{ И } \dots \text{ И } x_n = a_{n,j2}, \text{ с весом } w_{j2} \\ & \dots, \\ \text{ИЛИ} \quad & x_1 = a_{1,jk_j} \text{ И } x_2 = a_{2,jk_j} \text{ И } \dots \text{ И } x_n = a_{n,jk_j}, \text{ с весом } w_{jk_j} \end{aligned} \quad (17)$$

ТО

$$y = d_j, j = \overline{1, m},$$

Итак, выше описаны основные алгоритмы нечеткого логического вывода, каждый из которых возможно использовать при моделировании в MATLAB. Некоторые из них схожи или один является частным случаем другого. Выбор алгоритма осуществляется в соответствии с целями исследований и в соответствии с тем, в какой форме необходимо получить результаты НЛВ. В рамках данной работы выделено одиннадцать критериев оценки ИС, часть из них являются четкими, но большая часть нечеткими. Каждой лингвистической переменной x_i соответствует набор входных нечетких терм $\widetilde{a}_{ij}$. Каждая переменная x_i может быть четкой или нечеткой, в зависимости от того, какой

критерий оценки СУ производством она описывает. Каждому набору переменных в результате нечеткого логического вывода, ставится в соответствие нечеткое заключение y (согласно правилу). Заключение – это характеристика функционирования системы управления машиностроительным производством, которая в дальнейшем дефаззифицируется для получения итогового четкого вывода. Наиболее подходящим для этого алгоритмом нечеткого логического вывода является алгоритм Мамдани, так как нет необходимости представлять заключения в виде линейной функции от входов, как в методе Сугено, вывод по синглтонной базе знаний является частным случаем алгоритма Мамдани, а алгоритм вывода для задач классификации не подходит, потому что в работе нет задачи получения классифицирующих заключений.

Описание алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани

ФАЗЗИФИКАЦИЯ

Исходные четкие данные преобразуются в нечеткие.

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Формируется база знаний, состоящая из параметров оценки СУ x_i (где $i = \overline{1,11}$) и j -го числа правил, где $j = \overline{1,m}$ (таблица 6).

Таблица 6 - Нечеткая база знаний в виде таблицы

ЕСЛИ											ТО
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	y
$\widetilde{a}_{11}$	$\widetilde{a}_{21}$	$\widetilde{a}_{31}$	$\widetilde{a}_{41}$	$\widetilde{a}_{51}$	$\widetilde{a}_{61}$	$\widetilde{a}_{71}$	$\widetilde{a}_{81}$	$\widetilde{a}_{91}$	$\widetilde{a}_{10\ 1}$	$\widetilde{a}_{11\ 1}$	d_1
$\widetilde{a}_{12}$	$\widetilde{a}_{22}$	$\widetilde{a}_{32}$	$\widetilde{a}_{42}$	$\widetilde{a}_{52}$	$\widetilde{a}_{62}$	$\widetilde{a}_{72}$	$\widetilde{a}_{82}$	$\widetilde{a}_{92}$	$\widetilde{a}_{10\ 2}$	$\widetilde{a}_{11\ 2}$	d_2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\widetilde{a}_{1m}$	$\widetilde{a}_{2m}$	$\widetilde{a}_{3m}$	$\widetilde{a}_{4m}$	$\widetilde{a}_{5m}$	$\widetilde{a}_{6m}$	$\widetilde{a}_{7m}$	$\widetilde{a}_{8m}$	$\widetilde{a}_{9m}$	$\widetilde{a}_{10m}$	$\widetilde{a}_{11m}$	d_m

Составляется база знаний, назначается мера уверенность w_j для каждого j -го правила, задаются лингвистические правила для зависимости $Y = f(X)$, формула (18):

$$(x_1 = \widetilde{a}_{1j} \Theta_j \ x_2 = \widetilde{a}_{2j} \Theta_j \ ... \Theta_j \ x_n = \widetilde{a}_{nj} \text{ с весом } w_j) \Rightarrow y = \widetilde{d}_j, \ j = \overline{1,m}, \quad (18)$$

где $\widetilde{a}_{ij}$ – нечеткий терм, которым оценивается переменная x_i в j -м правиле, $\widetilde{d}_j$ – заключение j -го правила, m – количество правил в базе знаний, Θ_j – логическая операция в базе знаний, связывающая фрагменты антецедента j -го правила (И, ИЛИ), $\Rightarrow$ – нечеткая импликация, w_j – весовой коэффициент j -го правила, учитывающий меру уверенности ($w_j \in [0,1]$).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Задаются:

$\mu_j(x_i)$ – функция принадлежности входа $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ каждому нечеткому терму, формула (19):

$$\widetilde{a}_{ij}, \text{ т.е. } \widetilde{a}_{ij} = \int_{x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]} \mu_j(x_i) / x_i; \quad (19)$$

$\mu_{d_j}(y)$ – функция принадлежности выхода $y \in [\underline{y}, \overline{y}]$ каждому нечеткому терму, формула (20):

$$\widetilde{d}_j, \text{ то есть } \widetilde{d}_j = \int_{y \in [\underline{y}, \overline{y}]} \mu_{d_j}(y) / y \quad (20)$$

РАСЧЕТ СТЕПЕНЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОСЫЛОК КАЖДОГО J-ГО ПРАВИЛА

Для каждого входного вектора $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ расчет осуществляется согласно формуле (21):

$$\mu_j(X^*) = w_j \left(\mu_j(x_1^*) \chi_j \mu_j(x_2^*) \chi_j \dots \chi_j \mu_j(x_n^*) \right), j = \overline{1, m}, \quad (21)$$

где χ_j обозначает t -норму, если в j -м правиле базы знаний используется логическая операция $\Theta_j = \text{И}$, и соответствует s -норме при $\Theta_j = \text{ИЛИ}$. Обычно в методе Мамдани треугольные нормы реализуются операциями минимума (t -норма) и максимума (s -норма).

Результат нечеткого вывода представляется, согласно формуле (22), в виде:

$$\widetilde{y}^* = \left(\frac{\mu_1(X^*)}{\widetilde{a}_1}, \frac{\mu_2(X^*)}{\widetilde{a}_2}, \dots, \frac{\mu_m(X^*)}{\widetilde{a}_m} \right). \quad (22)$$

Носителем этого нечеткого множества является множество нечетких термов $\{\widetilde{d}_1, \widetilde{d}_2, \dots, \widetilde{d}_m\}$. Для перехода к нечеткому множеству на носителе $|\underline{y}, \overline{y}|$ необходимо выполнить операции импликации и агрегирования.

ИМПЛИКАЦИЯ

В логическом выводе для каждого j -го правила базы знаний значение выходной переменной y определяется по формуле (23):

$$\widetilde{d}_j^* = \text{imp}(\widetilde{d}_j, \mu_j(X^*)), j = \overline{1, m} \quad (23)$$

где imp – импликация, которая в нечетком выводе обычно реализуется операцией минимума, «срезанием» функции принадлежности $\mu_{d_j}(y)$ по уровню $\mu_j(X^*)$.

Математическая запись представлена в формуле (24):

$$\widetilde{d}_j^* = \int'_{y \in [\underline{y}, \overline{y}]} \min(\mu_j(X^*), \mu_{d_j}(y)) / y. \quad (24)$$

АГРЕГИРОВАНИЕ

Результат логического вывода по всей базе знаний находят агрегированием нечетких множеств, согласно формуле (25):

$$\widetilde{y}^* = \text{agg}(\widetilde{d}_1^*, \widetilde{d}_2^*, \dots, \widetilde{d}_m^*), \quad (25)$$

где agg – агрегирование нечетких множеств, которое обычно реализуется операцией максимума.

ДЕФАЗЗИФИКАЦИЯ

Четкое значение выхода y , соответствующее входному вектору X^* , определяется через дефаззификацию нечеткого множества $\widetilde{y}$. Наиболее часто применяемым методом является метод центра тяжести [54, 70].

Описаны основы построения математической модели нечеткого логического вывода Мамдани, однако необходимо подробно описать инструменты построения информационной модели, некую вычислительную среду.

Были выделены научные работы, описывающие инструменты (методы) разработки информационной модели, основанной на нечеткого логическом выводе, с применением пакета Fuzzy Logic Toolbox вычислительной системы

MATLAB. Пакет Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB позволяет эффективно работать с нечеткими множествами по средствам использования алгоритмов нечеткого вывода. Использование данного пакета MATLAB удовлетворяет цели и задачам работы.

Поэтому методом решения поставленных задач будет являться информационное моделирование оценки СУ с применением пакета Fuzzy Logic Toolbox вычислительной системы MATLAB.

При построении модели в MATLAB существуют принципиальные отличия, зависящие от характера входных данных. В случае, когда данные четкие, то есть заданные количественно, они просто передаются на вход в модель Simulink в виде констант. Далее вступает в работу файл, сформированный в Fuzzy Logic Toolbox, включающий базу знаний с термами. После обработки данных в базе знаний получаются выходные дефаззифицированные (четкие) данные, которые можно использовать в дальнейшем. Это позволяет избежать большого числа правил, которые в Fuzzy Logic Toolbox приходится задавать вручную.

Визуализация обработки четких данных алгоритмом нечеткого логического вывода Мамдани представлена на рисунке 26.

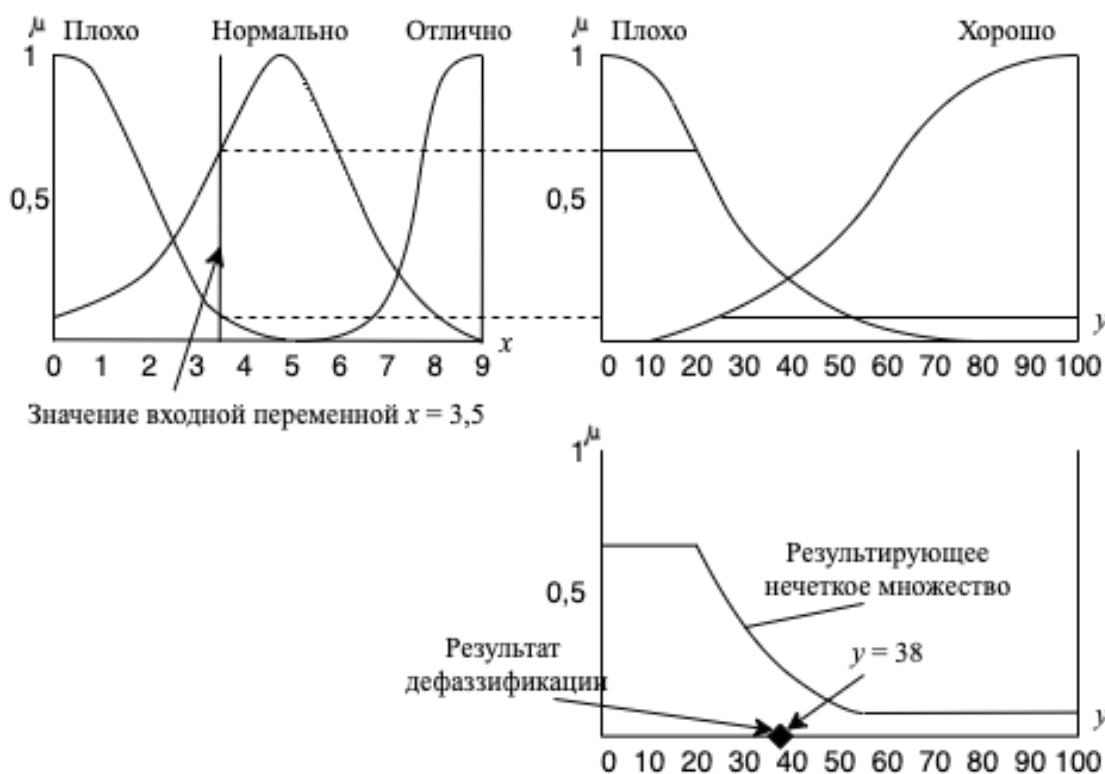


Рисунок 26 - Обработка четкого входного значения алгоритмом Мамдани

Имеется некая входная лингвистическая переменная, например «Целесообразность», описывающая работу системы, имеющая множества значений «Плохо», «Нормально», «Отлично» (заданы функциями принадлежности), на некотором множестве $X \in [0,9]$. Респондент дает четкую оценку переменной (критерию) $x = 3,5$ балла. Выходная лингвистическая переменная «Системность» имеет множество значений «Плохо», «Хорошо» (заданы функциями принадлежности) на множестве $Y \in [0,100]$ баллов. Четкое входящее значение применяется к входящим терм-множествам, ищутся пересечения. На основании заданных в Fuzzy Logic Toolbox правил осуществляется импликация, то есть срезание (функция минимума) выходных функций принадлежности. После чего происходит агрегирование всех срезанных выходных терм (функция максимума), после которого получается результирующее нечеткое множество. После этого происходит дефаззификация методом центра тяжести и получается четкое число на выходе $y = 38$, говорящее о том, что «Системность» рассматриваемой системы оценена в 38 баллов, с уверенностью в 35% ее можно назвать плохой, а с уверенностью в 25% хорошей.

В случае, когда входное значение, полученное от респондента, является нечетким, то есть выраженным качественно в лингвистической форме $x = \text{"Очень хорошо"}$, на вход в модель Simulink нельзя передать функцию принадлежности, заданную на интервале, да и сама функция принадлежности неизвестна (рисунок 27).

В таком случае необходимо вручную, вне пакета Fuzzy Logic Toolbox, найти пересечения нечеткого входного значения, представляющего собой новую терму с заданными термами (пересечения функций принадлежности). И передать в модель Simulink рассчитанное наиболее вероятное четкое число. Алгоритм расчета числа описан ниже. Далее ищутся пересечения найденного четкого числа с входными термами. На основании заданных в Fuzzy Logic Toolbox правил осуществляется импликация, то есть срезание (функция мини-

мум) выходных функций принадлежности. После чего происходит агрегирование всех срезанных выходных терм (функция максимума), после которого получается результирующее нечеткое множество. После этого происходит дефаззификация методом центра тяжести и получается четкое число на выходе $y = 66$, говорящее о том, что «Системность» рассматриваемой системы оценена в 66 баллов, с уверенностью в 2% ее можно назвать плохой, а с уверенностью в 68% хорошей.

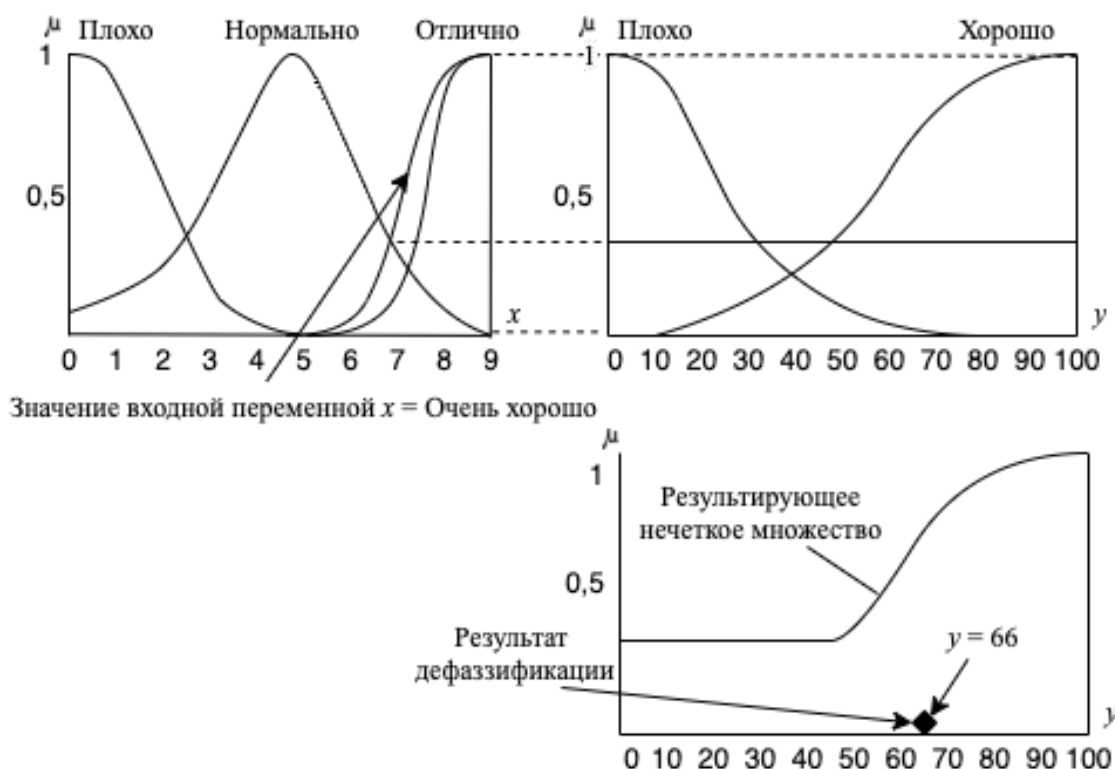


Рисунок 27 - Обработка нечеткого входного значения алгоритмом Мамдани
Алгоритм расчета

Шаг 1. Пусть известно, что критерий оценки системы управления машиностроительным производством имеет три входных терм-множества. Функции принадлежности терм-множеств заданы в Fuzzy Logic Toolbox в редакторе функций принадлежности (Membership Function Editor, рисунок 28, рисунок 29) и имеют тип и параметры, заданные в полях «Type» и «Params» соответственно.

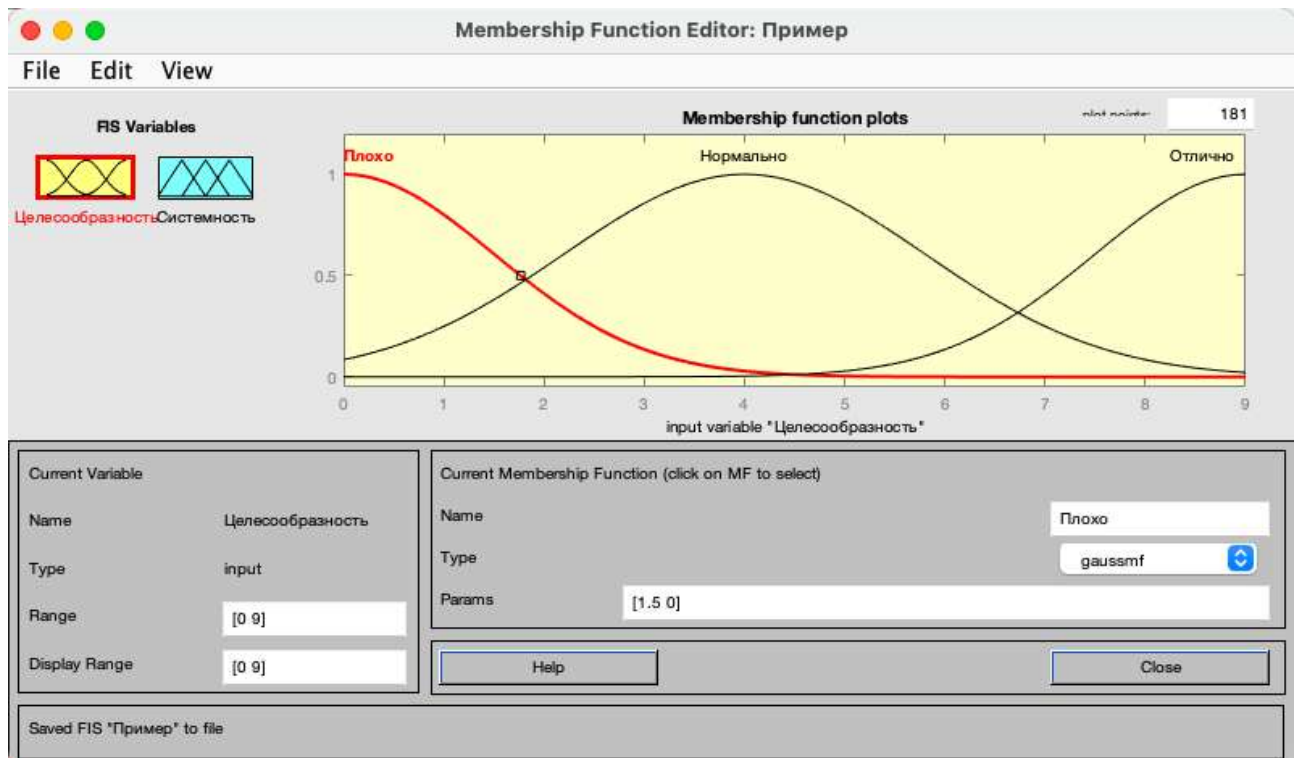


Рисунок 28 - Тип и параметры функций принадлежности заданных входных терм

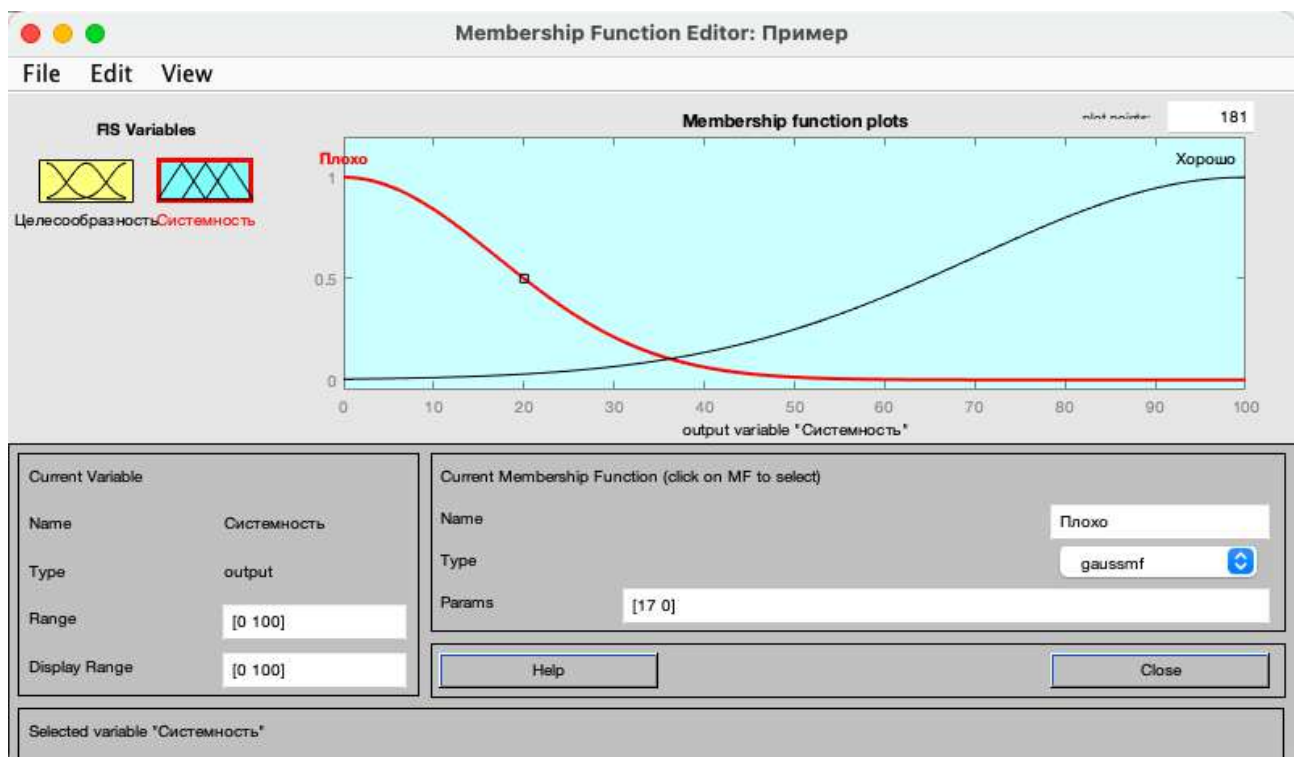


Рисунок 29 - Тип и параметры функций принадлежности заданных выходных терм

Этой информации достаточно, чтобы задать функцию в MATLAB. Так если «Type» – `gaussmf`, а «Params» – `[1.5 0]` в таком случае функцию принадлежности можно задать в соответствии с формулой (26):

$$\text{"Плохо"} = \text{gaussmf}(x, [1.5, 0]), \quad (26)$$

где «Плохо» – значение переменной, x – интервал построения функции принадлежности, `gaussmf` – тип функции принадлежности, `[1.5 0]` – параметры функции. Таким образом определяются формулы функций принадлежности для трех входных терм-множеств.

Шаг 2. Известно, что оцениваемый критерий системы управления машиностроительным производством (лингвистическая переменная) был описан новым значением, которое представляет новое терм-множество и содержит в себе новую функцию принадлежности. Необходимо найти пересечение новой функции принадлежности с заданными функциями принадлежности входных терм. В зависимости от смысла содержания входной переменной определяется ее тип и положение на универсальном множестве относительно базовых терм. В пакете Curve Fitting Toolbox на основании заданного массива точек и типа кривой строится кривая, программа определяет ее коэффициенты самостоятельно.

В технической документации MATLAB описано, что функция типа `gaussmf` имеет следующий вид, в соответствии с формулой (27):

$$f(x, \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}}, \quad (27)$$

где σ, c – коэффициенты.

Сопоставление формулы, найденной в Curve Fitting Tool говорит, что в Curve Fitting Tool формула найдена верно, идентично формуле в Fuzzy Logic Toolbox. Значения заданные в «Params» – это коэффициенты из Curve Fitting Tool.

Шаг 3. В MATLAB формируется вспомогательный скрипт, находящий точки пересечения функции принадлежности новой термы с функциями при-

надлежности заданных терм. Ищется среднее значение по y (μ). Функция принадлежности новой термы выражается относительно аргумента y (μ). В нее подставляется значение найденной μ и находится наиболее вероятное четкое значение x критерия, которое в дальнейшем передается на вход в модель Simulink.

Разработку информационной модели анализа системы управления машиностроительным производством, основанной на нечетком логическом выводе, можно условно поделить на этапы, представленные ниже [67].

Этап 1. Определение объекта исследований. Определение ключевых показателей и выделение из них критериев оценки системы управления машиностроительным производством. Классификация критериев, определение четких и нечетких критериев. В случае большого количества критериев, разработка каскадной схемы их обработки (Приложение Б).

Этап 2. Получение входных данных для критериев, применяемых для анализа системы управления машиностроительным производством.

Этап 3. Формирование входных терм-множеств для каждого критерия оценки системы управления машиностроительным производством. Открытие FIS-редактора путем написания слова «fuzzy» в командной строке MATLAB. Добавление выделенных входных критериев, выходного критерия (лингвистических переменных) в раздел Fuzzy Logic Designer для каждого блока каскадной схемы. Выбор одного алгоритма НЛВ (Мамдани, Сугено и т.д.). Определение принципа сочетания переменных в правилах (And method, Or method). Определение параметров импликации, агрегирования и дефаззификации (рисунк 30).

Этап 5. Формирование баз знаний для каждого блока каскадной схемы в разделе Rule Editor. Формирование файлов НЛВ из Fuzzy Logic Toolbox для каждого блока каскадной схемы, например – KnowledgeBase1_1.fis.

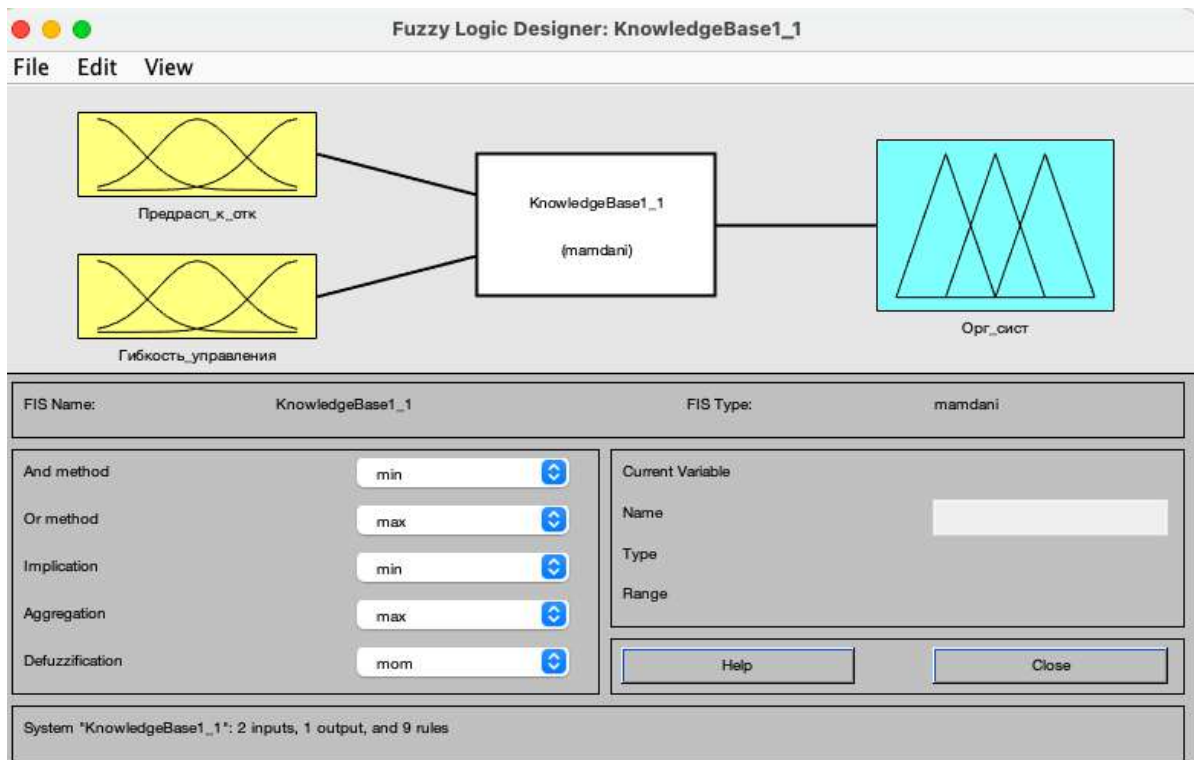


Рисунок 30 - Формирование терм-множеств и параметров НЛВ

Этап 4. Формирование функций принадлежности для входных и выходных терм-множеств в разделе Membership Function Editor (рисунок 31 - 33).

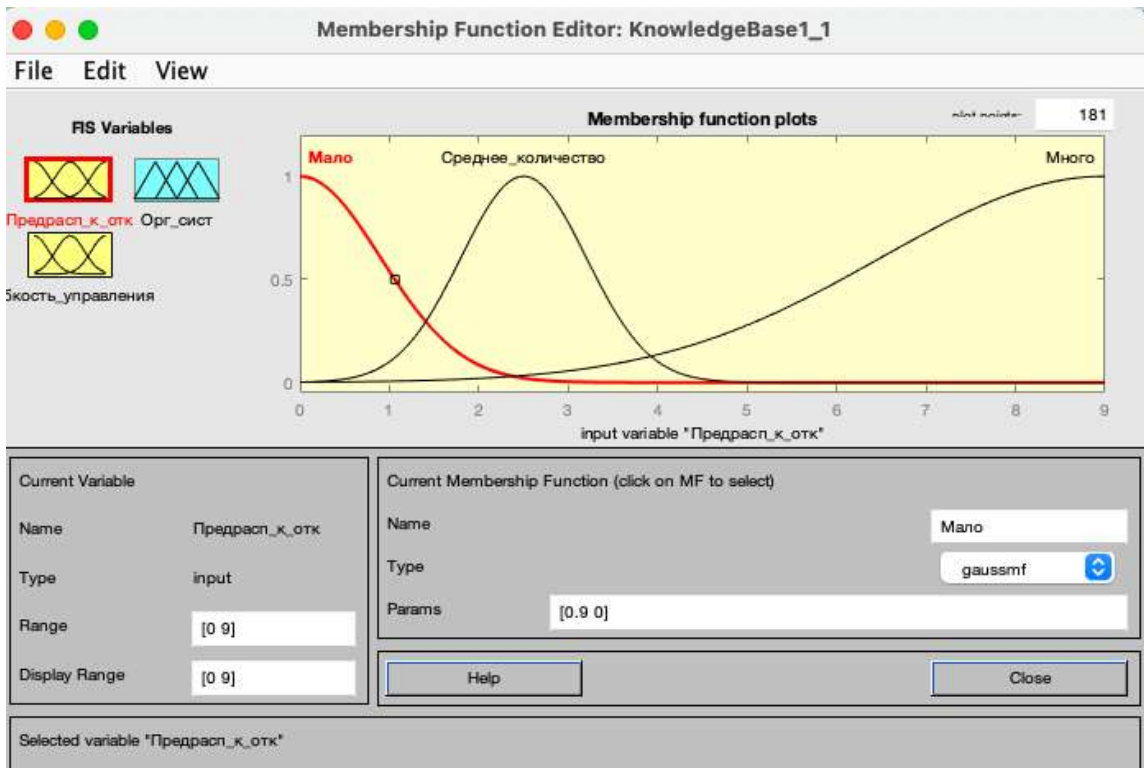


Рисунок 31 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Предрасположенность к отказам»

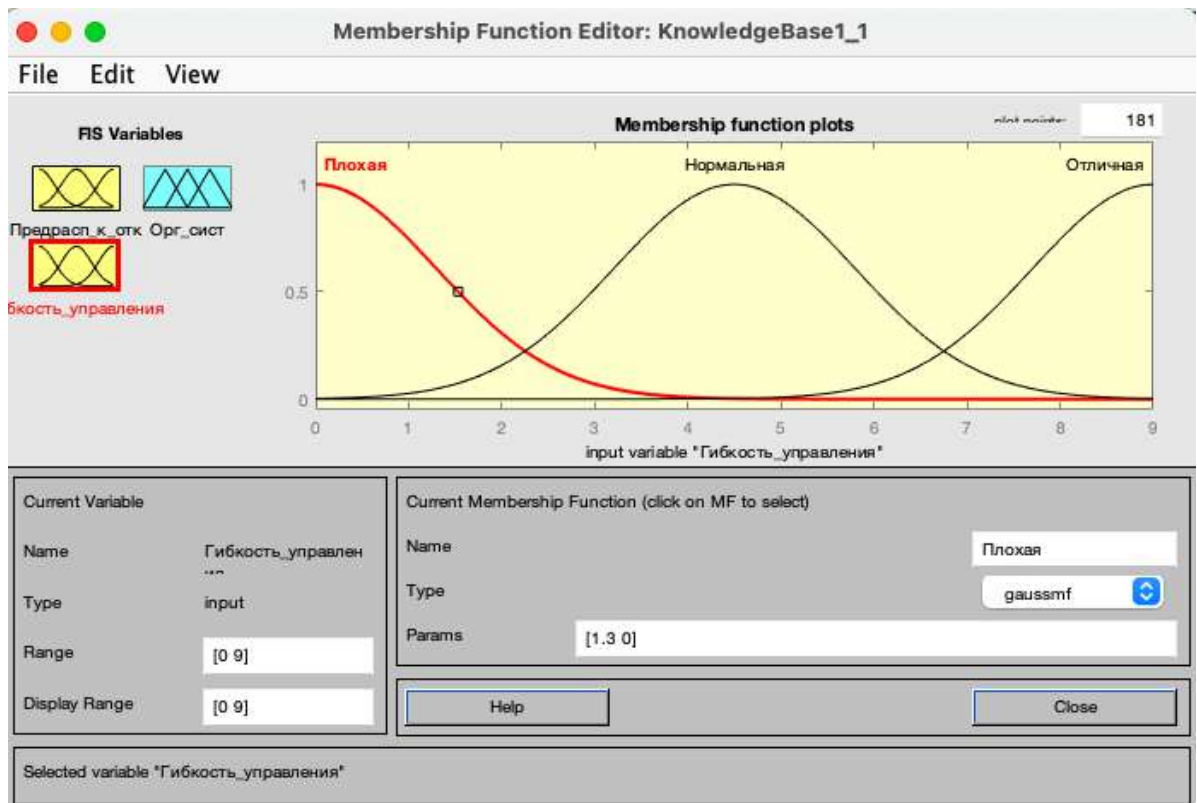


Рисунок 32 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Гибкость управления»

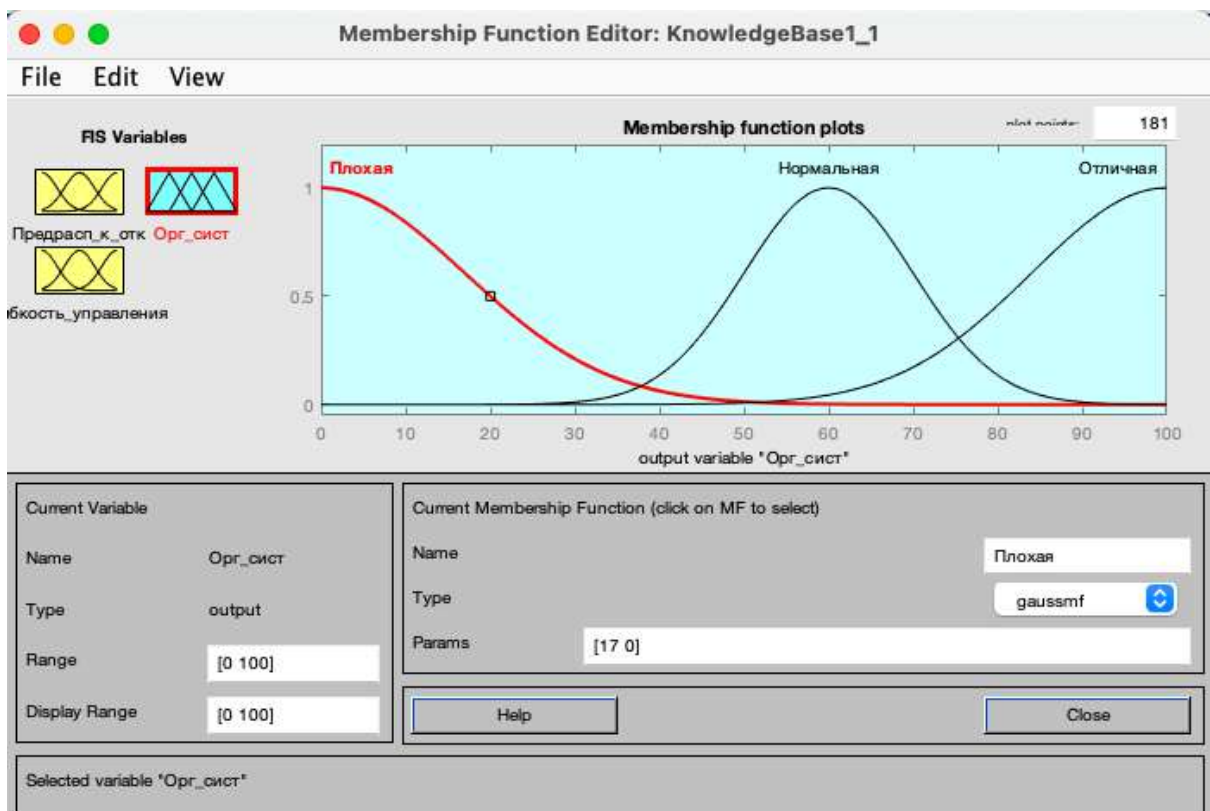


Рисунок 33 - Функции принадлежности выходных терм-множеств критерия «Организационная система»

Этап 6. Разработка модели в Simulink (рисунок 34). На входы модели поступают четкие значения критериев (блок Constant), которые будут определены в главном скрипте. Далее значения поступают в мультиплексор (блок Mux), который комбинирует входные данные. Комбинированные данные из мультиплексора попадают в блок Fuzzy Logic Controller, в который в главном скрипте будет прописан файл НЛВ (KnowledgeBase1_1.fis). Полученный результат дефаззификации записывается в переменную Result1_1 [152].

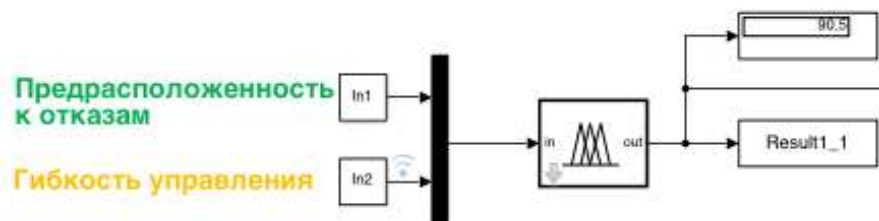


Рисунок 34 - Модель в Simulink

В случае наличия каскадной схемы для большого числа критериев, модель будет в Simulink будет иметь несколько уровней.

Этап 7. Формирование главного скрипта информационной модели. Задача данной скрипта состоит в том, чтобы взять входные данные критериев оценки системы управления машиностроительным производством из источника, например файла Excel, обработать и в случае, если данные являются четкими передать в информационную модель Simulink. В случае, если данные являются нечеткими, проанализировать результаты расчета скрипта, описанного в предыдущей части работы и передать на вход в модель Simulink наиболее вероятное четкое значение критерия.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

Оценка УЦЗ становится все более актуальной задачей для многих машиностроительных предприятий. Чаще всего для оценки УЦЗ применяют метод анкетирования. Стандартная структура анкеты представляет собой вводную часть, где предприятие отражает краткую информацию о себе: количество сотрудников, прибыль, принадлежность к определенному сектору промышленности.

Изученные методы оценки УЦЗ предлагают оценку по различным направлениям, связанным как с технологией, так и с организационной структурой предприятия. Стоит отметить, что среди направлений для оценки УЦЗ также выделяют культурный аспект, который отвечает за восприятие людьми новой культуры общения, которая изменилась под влиянием цифровых технологий.

Среди недостатков существующих методов оценки УЦЗ предприятия можно выделить отсутствие явной взаимосвязи между оцениваемыми направлениями. Каждое направление рассматривается индивидуально, и не учитывает степень развития других направлений, тогда как в реальности они взаимосвязаны и оказывают существенный вклад на развитие друг друга и машиностроительного производства в целом. Лучшее представление о взаимосвязях между направлениями работы предприятия можно выявить на основе эталонных моделей IIRA и RAMI 4.0.

Существующие методы оценки УЦЗ позволяют достаточно подробно описать состав направлений и определить ее уровень, что позволит дополнить эталонные модели.

При разработке собственной архитектуры для оценки УЦЗ должны быть учтены преимущества изученных моделей и методов. Особое внимание необходимо уделить списку направлений и учету взаимосвязей между ними, а также моделью жизненного цикла и уровнем цифровизации каждого направления.

Сталкиваясь с задачей внедрения системы управления машиностроительным производством и желанием улучшить процессы на предприятии, следует разумно подходить к вопросу выбора критериев и применять уже готовые или разработанные предприятием для конкретного проекта перечни. При выборе конфигурации системы управления машиностроительным производством следует четко понимать, чего требуется достичь и какие параметры будут определять конечное решение.

Существуют различные методики и критерии для оценки систем управления машиностроительным производством, а также множество подходов для оценки конкретных участков системы.

Большая часть критериев для оценок относится к одной из следующих категорий: функциональные возможности, стоимость, перспективы развития, технические характеристики, минимизация рисков, экономическая выгода, относящиеся к классу технологичности, безопасности, экономичности. Однако показатели, связанные с эргономикой, индивидуальным восприятием пользователя не учитываются при проектировании системы управления машиностроительным производством из-за сложности проведения объективной оценки. Критерии CISE, которые определяют когнитивные факторы пользователя при взаимодействии с системой, сложно измерять обычными методами.

Для оценки данных критериев предложено использование методов измерения физиологических реакций, например, айтрекинг, измерение ЧСС, отвечающих за взаимодействие пользователя с системой управления машиностроительным производством. Такие инструменты позволяют проводить более достоверную и независимую оценку ряда критериев, отвечающих за когнитивные факторы.

Развитие и совершенствование этих исследований будет во многом способствовать реализации таких целей как: оптимальное удовлетворение запросов и предпочтений пользователей и потребителей, повышение качества СУ. Развитие системы управления машиностроительным производством, повышение качества и удобства использования с точки зрения взаимодействия с человеком можно улучшить благодаря исследованиям психофизиологических реакций человека.

По когнитивным критериям с использованием метода комбинаторной оптимизации по Парето можно проводить оптимизацию системы управления машиностроительным производством. Например, выявлять оптимальную компоновку элементов интерфейса, при котором среднее значение длины

маршрута блуждания взгляда стремится к минимальному, ЧСС в пределах нормы, время до целевого действия также стремится к минимальному.

Также для части критериев можно анализировать критерии оценки системы в MATLAB, основанной на алгоритме нечеткого логического вывода, заданного в Fuzzy Logic Toolbox. При определении структуры нечеткого логического вывода модель будет разрабатываться с дискретным выходом с использованием алгоритма Мамдани.

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

3.1. Элементарная модель принятия решения при выборе конфигурации архитектуры системы управления производством

При моделировании систем управления машиностроительным производством необходимо учитывать многоуровневую структуру производственных объектов, а также наличие упорядоченных отношений между отдельными элементами и их группами. Элементы объекта обладают различной степенью важности или приоритетности с точки зрения обеспечения качества продукции. Более того, каждый элемент или их группа характеризуются собственными целевыми функциями, которые могут различаться по размерности и физической интерпретации в контексте стандартизации.

В такой ситуации согласование элементов системы управления машиностроительным производством должно осуществляться с учетом их приоритетности и приведения к сопоставимой размерности. Наиболее распространенным способом формализации приоритетности в организации производства является использование древовидной структуры, организующей элементы по уровням иерархии в соответствии с требованиями нормативных документов.

Рассмотрим многоуровневую иерархическую схему объектов, представленную в виде ориентированного дерева с уровнями $\gamma = 1, 2, \dots, \gamma'$. Предполагается, что данная структура отражает иерархические взаимосвязи объектов с точки зрения источника распределяемых ресурсов в системе менеджмента качества.

Пусть γ обозначает произвольный уровень дерева объектов. Элементы, принадлежащие уровню γ , будем обозначать как $b_{\varphi}^{(\omega_{\gamma}, \gamma)}$, где:

- φ – номер элементарного объекта на данном уровне;
- ω_{γ} – номер элементарной иерархии уровня γ .

Например, $b_2^{(1,3)}$ представляет элемент уровня 3 под номером 2 из иерархии 1.

Под элементарной иерархией ω_γ понимается группа элементов уровня γ , имеющих непосредственную связь с одним из элементов (управляющим) вышестоящего уровня $\gamma - 1$. Таким образом, количество элементов на уровне $\gamma - 1$ определяется числом элементарных иерархий на уровне γ . Элемент $b_{\gamma-1}^{(\varphi)\omega_{\gamma-1}}$ назовем управляющим для элементов своей иерархии $\{b_\gamma^{(\varphi)\omega_\gamma}\}$.

Опишем четырехуровневую схему объектов и их взаимосвязей в контексте архитектуры системы управления качеством продукции. В целом по четырем уровням дерева имеется множество объектов B , а именно:

$$B = \{B_1, B_2, B_3, B_4\},$$

где:

- $B_1 = \{b_1^{(1,1)}, b_2^{(1,1)}, \dots, b_{n_1}^{(1,1)}\}$ – уровень стратегического управления качеством (политика качества, целевые показатели);
- $B_2 = \{b_1^{(\omega_2,2)}, b_2^{(\omega_2,2)}, \dots, b_{n_2}^{(\omega_2,2)}\}$ – уровень тактического планирования (процессы обеспечения качества, стандартизация);
- $B_3 = \{b_1^{(\omega_3,3)}, b_2^{(\omega_3,3)}, \dots, b_{n_3}^{(\omega_3,3)}\}$ – уровень оперативного управления (контроль качества, мониторинг процессов);
- $B_4 = \{b_1^{(\omega_4,4)}, b_2^{(\omega_4,4)}, \dots, b_{n_4}^{(\omega_4,4)}\}$ – уровень исполнительных механизмов (производственные операции, измерения).

Подмножества B_1, B_2, B_3, B_4 определяют совокупности объектов, принадлежащих определенному уровню иерархии системы менеджмента качества в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 9001.

Важность или приоритетность объекта в системе управления производством фиксируется путем введения специальных приоритетных характеристик, отображающих сравнительные свойства объектов с точки зрения их влияния на качество продукции. Для всякого объекта можно задать m приоритетных характеристик:

$$h^{(m)} = \{h^{(1)}, h^{(2)}, \dots, h^{(m)}\},$$

каждая из которых описывает отдельное свойство объекта (параметры качества, соответствие стандартам, технологические ограничения).

По приоритетным характеристикам можно рассчитать интегральный показатель приоритета объекта:

$$H = \sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot h^{(m)}, \quad (28)$$

где α_m – весовые коэффициенты, определяемые в процессе настройки системы управления качеством в соответствии с требованиями нормативных документов.

Число и размерность приоритетных характеристик, а также размерность показателя приоритета для объектов одного уровня должны быть одинаковы. Интегральная характеристика, вычисленная по формуле (28), позволяет осуществлять сравнительный анализ объектов одного уровня иерархии и ранжировать их по степени влияния на качество продукции.

В контексте управления качеством и стандартизации зададим:

- X – измеримое пространство элементов x (единиц продукции, результатов измерений);
- $\mathcal{F}_x$ – σ -алгебра x -множеств;
- P – вероятностная мера, определенная на σ -алгебре $\mathcal{F}_x$.

Пусть система F есть отображение процессов контроля качества, протекающих в реальной производственной системе A по законам, определяемым системой стандартов G , а именно:

$$F: A \xrightarrow{G} \mathcal{F}_x.$$

Система F по отношению к A разбивается на две подсистемы:

$$F = F^+ \cup F^-, \quad (29)$$

где $i + j = n$ и

$$F^+ = \{f_1^+, f_2^+, \dots, f_i^+\}, F^- = \{f_1^-, f_2^-, \dots, f_j^-\}.$$

Введем терминологию:

1. Система $A(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q)$ – реальная производственная система с критерием функционирования K (показатели качества продукции), в которой действуют требования системы стандартов G (ГОСТ, ТУ, СТП).

2. Система стандартов G – совокупность нормативных требований g_l , где $g_l \in G$ – отдельное требование стандарта в функции l ; l представляет пространство параметров качества, время, либо оба параметра одновременно.

3. $F^+(f_1, f_2, \dots, f_i) \subset F$ – подсистема, состоящая из x -множеств, удовлетворяющих критерию качества K (годная продукция).

4. $F^-(f_1, f_2, \dots, f_i) \subset F$ – подсистема, состоящая из x -множеств, не удовлетворяющих критерию качества K (брак, отклонения).

Поскольку на F существует вероятностная мера P , то каждому $f \in \mathcal{F}_x$ можно поставить в соответствие некоторое число, называемое его вероятностью, при условии $l = \text{const}$. Назовем абсолютной вероятностью положительных F^+ и отрицательных F^- x -множеств соответственно числа:

$$\left. \begin{aligned} P(F^+) &= \sum_{k=1}^i P(f_k^+) \\ P(F^-) &= \sum_{l=1}^j P(f_l^-) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

и введем ограничение:

$$\sum_{k=1}^i P(f_k^+) + \sum_{l=1}^j P(f_l^-) = 1. \quad (31)$$

В дальнейшем x -множества, относящиеся к F^+ и F^- , для удобства будем именовать соответственно положительными и отрицательными отдельными фактами (единицами годной и дефектной продукции), а систему F – системой фактов.

Итак, имеем: i – число единиц годной продукции, j – число единиц дефектной продукции. Исходя из этого, $P(F^+)$ и $P(F^-)$ определяют положительную и отрицательную части всех рассматриваемых фактов, которые в то же время можно трактовать как вероятности положительного или отрицательного

решения о соответствии продукции требованиям стандартов с чисто количественной точки зрения.

Рассмотрение и выбор показателей качества, необходимых для принятия решения о соответствии продукции, представляет сложную задачу, поскольку показатели могут иметь различную информационную значимость. Поэтому наряду с абсолютной вероятностью в системе управления качеством будем использовать информационную характеристику, а именно:

$$\left. \begin{aligned} H^+ &= \sum_{k=1}^i P(f_k^+) \log P(f_k^+) \\ H^- &= \sum_{l=1}^j P(f_l^-) \log P(f_l^-) \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Выражения (32) определяют собственные энтропии подсистем годной и дефектной продукции в контексте теории информации и могут использоваться для оценки неопределенности в системе контроля качества.

Степенью обоснованности решения о соответствии продукции критерию качества K при действии системы стандартов G назовем величину S при условии (30) и величину S_0 при информационной характеристике (32), где:

$$\left. \begin{aligned} P(F^+, \lambda) &= \sum_{k=1}^i P(f_k^+, \lambda) \\ P(F^-, \lambda) &= \sum_{l=1}^j P(f_l^-, \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$\left. \begin{aligned} H^+(\lambda) &= \sum_{k=1}^i P(f_k^+, \lambda) \log P(f_k^+, \lambda) \\ H^-(\lambda) &= \sum_{l=1}^j P(f_l^-, \lambda) \log P(f_l^-, \lambda) \end{aligned} \right\}$$

Эти выражения справедливы при $l = \text{const}$.

Критерий интерпретации степени обоснованности:

- при $S > 0$ решение о соответствии считается обоснованным (преобладает годная продукция);
- при $S = 0$ невозможно сделать окончательного заключения о качестве партии (неопределенность);
- при $S < 0$ решение о соответствии считается необоснованным (преобладает брак).

Рассмотрим значение степени обоснованности при $l = \text{var}$. При переменном l меняются система стандартов и значения параметров качества относительно критерия K . Вследствие этого вероятности отдельных фактов изменятся, в результате получим распределение вероятностей в пространстве параметров качества.

Выражения (30) и (32) при этом примут вид:

$$P(F_l^+) = \frac{i_l}{n_l}, P(F_l^-) = \frac{j_l}{n_l}, \quad (34)$$

$$H(F_l^+) = -P(F_l^+) \cdot \log_2 P(F_l^+), H(F_l^-) = -P(F_l^-) \cdot \log_2 P(F_l^-). \quad (35)$$

Соответственно, степень обоснованности станет переменной величиной и будет иметь вид:

$$S_l = P(F_l^+) - P(F_l^-), S_{0,l} = H(F_l^+) - H(F_l^-). \quad (36)$$

Ряд, составленный из значений степени обоснованности за период T_l в функции l , определяет изменение качества в процессе производства, а именно:

$$\{S_{l_1}, S_{l_2}, \dots, S_{l_T}\}. \quad (37)$$

Причем $\sum_{l=1}^T S_l$ характеризует суммарную степень обоснованности за производственный цикл.

Для графического отображения выражения (30) или (32) представим в виде решетчатой функции:

$$S(l) = \sum_{k=1}^l \Delta S_k. \quad (38)$$

Изменение степени обоснованности за период T_l также легко представить графически. Для этого перепишем выражение в виде:

$$\Delta S_l = S_l - S_{l-1}. \quad (39)$$

Исследование возможных разновидностей ряда, построенного на основании выражения (37), дает следующую классификацию:

1. Положительный ряд. Пусть ряд $\{S_l\}$ состоит только из положительных членов, т.е.

$$S_l > 0, \forall l = 1, \dots, T.$$

Производственный процесс, соответствующий такому ряду, назовем стабильным положительным процессом (устойчивое качество).

Введем понятие «коэффициент обоснованности»:

$$R = \frac{S_l - S_{l-1}}{S_{l-1}}. \quad (40)$$

Если ряд, построенный из значений степени обоснованности за период T_l , будет положительным, то коэффициент обоснованности будет указывать на изменение качества при каждом последующем контроле относительно предыдущего.

Итак:

- при $R > 0$ – S_l возрастает (тенденция к улучшению качества);
- при $R = 0$ – $S_l = \text{const}$ (стабильное качество);
- при $R < 0$ – S_l убывает (тенденция к ухудшению качества).

По величине R можно судить о качестве продукции в настоящий момент и о его тенденциях в будущем, если через l обозначено время t . Если l – параметр пространства (например, номер производственной линии), то по R можно судить о тенденции качества при переходе от одной линии к другой. Степень обоснованности за период T_l в данном случае будет всегда положительной.

2. Отрицательный ряд. Если ряд $\{S_l\}$ состоит только из отрицательных членов, т.е.

$$S_l < 0, \forall l = 1, \dots, T,$$

то производственный процесс, соответствующий такому ряду, будет иметь критическое отрицательное значение (систематический брак). Коэффициент обоснованности вводится аналогично предыдущему случаю. Степень

обоснованности за период T_l в этом случае будет всегда отрицательна, что требует принятия корректирующих действий.

3. Знакопеременный ряд. В случае, когда ряд $\{S_l\}$ состоит из членов неодинаковых знаков, т.е. положительные члены могут чередоваться с отрицательными, коэффициент обоснованности R определится следующим образом.

Теперь имеем ступенчатую функцию:

$$S(l) = \begin{cases} S_l^{(1)}, & l \in [l_0, l_1], \\ S_l^{(2)}, & l \in [l_1, l_2], \\ \dots, \\ S_l^{(m)}, & l \in [l_{m-1}, l_m]. \end{cases} \quad (41)$$

Тогда:

$$R = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{S_{l_k} - S_{l_{k-1}}}{S_{l_{k-1}}}. \quad (42)$$

Коэффициент R дает представление о качестве за период. Для перехода к обычному коэффициенту обоснованности R необходимо разбить период T_l на ряд более элементарных интервалов и получить отношение степеней обоснованности на интервалах $T_l^{(1)}$ и $T_l^{(2)}$, где m – число разбиений T_l на подынтервалы, причем S_{l_k} и $S_{l_{k-1}}$ должны иметь одинаковые знаки. Откуда:

$$R = \prod_{k=1}^m \left(1 + \frac{\Delta S_k}{S_{k-1}} \right)^{1/m} - 1. \quad (43)$$

Данный анализ исчерпывает все возможные случаи динамики качества в производственной системе.

Блок-схема элементарной модели, соответствующая разработанному алгоритму принятия решений о соответствии продукции, представлена на рисунке 35.

Блок разделения фактов (блок 1) представляет собой логическое устройство, определяющее принадлежность единиц продукции к годным или дефектным и вычисляющее их.

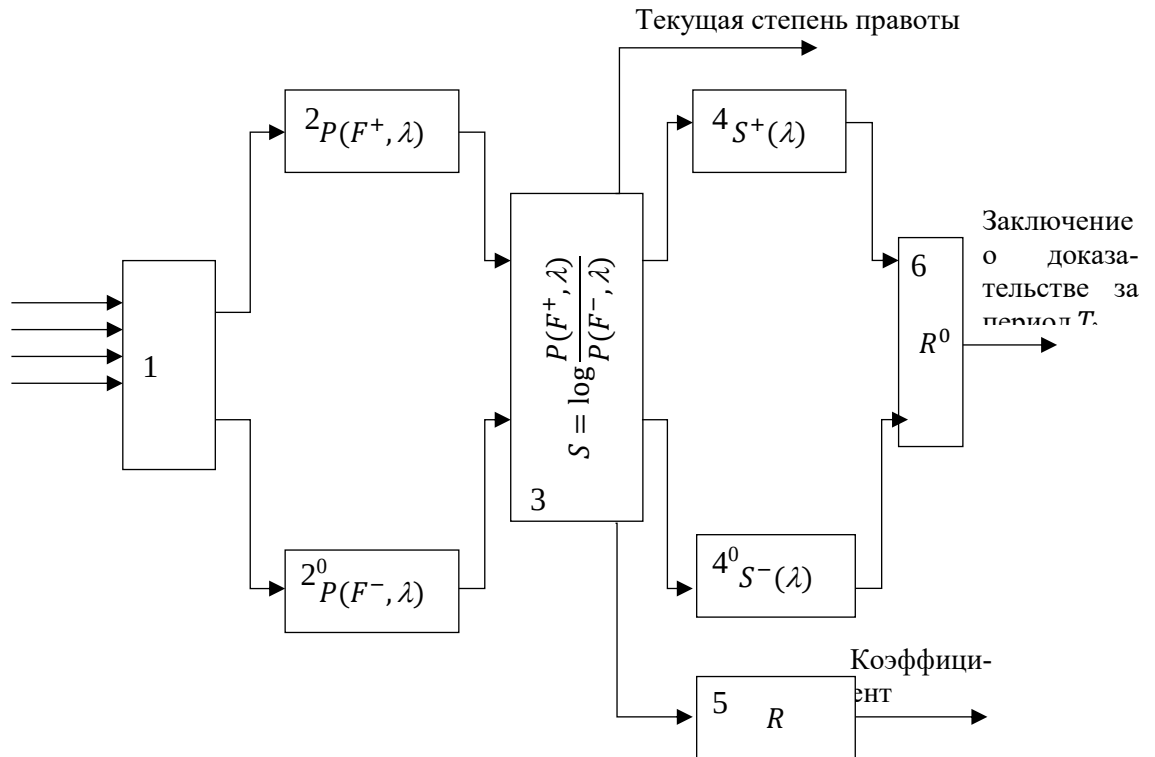


Рисунок 35 – Блок-схема элементарной модели

Структурно блок 1 представлен на рисунке 36. Блок работает следующим образом. Вводится доказываемое положение, которое разбивается на множество элементарных характеристик. Далее из блока памяти фактов по очереди выбираются все факты, которые также разбиваются на элементарные характеристики.

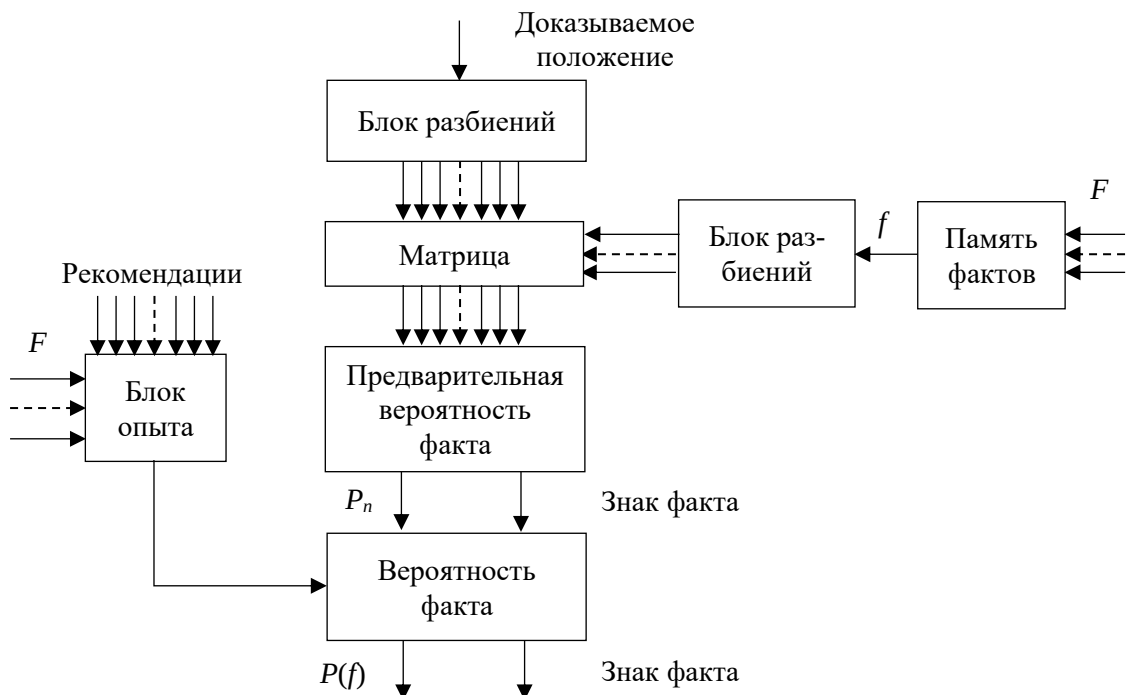


Рисунок 36 - Блок разделения фактов

Архитектура модуля классификации входных данных (блок 1) иллюстрируется рисунком 36. Принцип работы данного модуля заключается в следующей последовательности операций.

На входной интерфейс системы управления машиностроительным производством поступает верифицируемое утверждение (гипотеза о соответствии изделия установленным требованиям), которое подлежит декомпозиции на совокупность атомарных признаков (контролируемых характеристик качества). Параллельно из репозитория накопленных данных последовательно извлекаются предварительно сохраненные сведения (результаты измерительных процедур, операции технического контроля, данные инспекционных проверок), которые также подвергаются процедуре декомпозиции на атомарные признаки.

Процедура верификации заключается в попарном сопоставлении атомарных признаков верифицируемого утверждения и извлеченного факта посредством матричного оператора. В процессе сопоставления система управления машиностроительным производством регистрирует количество идентичных и различающихся признаков. В ситуации, когда количество совпадений превосходит количество различий, факту присваивается положительная полярность (+), в противном случае – отрицательная (–).

На основании полученного соотношения вычисляется априорная вероятность факта P_{Π} . Прямая зависимость: увеличение числа совпадающих признаков приводит к росту значения вероятности, уменьшение – к ее снижению.

Пример расчета. В ходе верификации утверждение и факт были декомпозированы на 100 атомарных признаков. В результате сопоставления выявлено 66 совпадений и 34 различия. Следовательно, полярность факта – положительная (+), а априорная вероятность вычисляется по выражению:

$$P_{\Pi} = \frac{66}{100} \cdot Z(A) = 0,66 \cdot Z(A),$$

где $Z(A)$ – оператор выбора методики расчета P_{Π} , специфицируемый в зависимости от контекста задачи обеспечения качества.

Конкретизация оператора $Z(A)$ определяется типом решаемой задачи (входной инспекционный контроль, межоперационный контроль, приемочная сертификация). По завершении расчета априорной вероятности модель активирует модуль эвристических знаний, содержащий экспертные рекомендации, поступающие из внешних источников (квалифицированные экспертные оценки, предписания нормативно-технической документации, агрегированные статистические данные о надежности контрагентов).

Характер влияния модуля эвристических знаний на итоговое значение вероятности факта вариабелен и детерминируется спецификой производственного контекста. Интеграция данного модуля обеспечивает расширение функциональных возможностей модели и повышение адекватности генерируемых управленческих решений. Степень расширения функционала определяется как емкостью репозитория фактов, так и содержательным наполнением модуля эвристических знаний.

Проектирование модуля эвристических знаний представляет собой комплексную научно-техническую задачу, поскольку данный компонент оказывает решающее воздействие на формирование итоговой вероятностной оценки и, как следствие, на верифицирующее решение.

Модули 2 и 2° осуществляют расчет усредненной мощности массива фактов согласно выражениям (33) и (34):

$$S = P(F^+) - P(F^-), S_0 = H(F^+) - H(F^-).$$

Функциональное назначение данных модулей – вычисление актуального уровня обоснованности управленческого решения на базе вероятностно-информационных характеристик обработанных данных.

Модуль 3 обеспечивает вычисление текущей величины степени обоснованности согласно выражениям (35) и (36):

$$S_l = P(F_l^+) - P(F_l^-), S_{0,l} = H(F_l^+) - H(F_l^-).$$

Модуль реализует функцию динамического мониторинга показателей качества в режиме реального времени по мере поступления новых измерительных данных.

Модули 4 и 4° производят агрегацию суммарной мощности положительных и отрицательных фактов по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} S^+(\lambda)_{T_\lambda} &= \int_0^{T_\lambda} S^+(\lambda) d\lambda \\ S^-(\lambda)_{T_\lambda} &= \int_0^{T_\lambda} S^-(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\}$$

Функционал модулей – консолидация информации за отчетный производственный интервал (рабочая смена, производственная партия, календарный месяц) с целью формирования интегральной оценки качества.

Модуль 5 осуществляет расчет коэффициента обоснованности согласно выражению:

$$R = \log \frac{S(\lambda_{\delta+1})}{S(\lambda_\delta)}$$

Значение коэффициента R обеспечивает возможность количественной оценки вектора динамики качества (положительная динамика, стабилизация, деградация) и формирования прогноза качества для последующих производственных циклов.

Модуль 6 генерирует итоговое верифицирующее заключение за отчетный период T_λ согласно выражению:

$$R^0 = \log \frac{S^+(\lambda)_{T_\lambda}}{S^-(\lambda)_{T_\lambda}}$$

На основании численного значения ΣS система управления производством формирует одно из трех альтернативных решений:

- $R^0 > 0$ – производственная партия идентифицируется как соответствующая установленным требованиям;
- $R^0 = 0$ – требуется проведение дополнительных аналитических процедур (зона неопределенности);
- $R^0 < 0$ – производственная партия идентифицируется как несоответствующая, необходима реализация корректирующих мероприятий.

Представленная базовая модель обеспечивает возможность формирования верифицирующего заключения относительно гипотезы о соответствии

(решение о соответствии продукции требованиям нормативно-технической документации) как за регламентированный отчетный интервал, так и в режиме реального времени.

Область интеграции модели – система менеджмента качества машиностроительным производством. Функциональное назначение:

- автоматизация процедур принятия верифицирующих решений о качестве продукции;
- непрерывный мониторинг вектора динамики показателей качества;
- генерация статистической отчетности для оценки результативности системы менеджмента качества;
- информационная поддержка процедур принятия решений в ходе внутренних и внешних аудиторских проверок.

Перспективное направление развития модели – расширение функционала модуля эвристических знаний посредством интеграции алгоритмов машинного обучения, что обеспечит адаптацию системы к переменным производственным условиям и повысит качество принимаемых решений.

3.2. Критерии надежности архитектуры системы управления производством

Любая техническая система представляет собой совокупность множества взаимосвязанных элементов. Даже при условии нахождения всех параметров элементов в пределах установленных допусков, вследствие существующих технологических отклонений, каждый элемент при эксплуатации по целевому назначению демонстрирует индивидуальное поведение. Значения параметров элементов и систем функционируют как случайные величины, распределенные в определенных диапазонах согласно различным законам распределения [113, 173].

Дополнительный источник неопределенности вносят погрешности измерительных процедур. Совокупное действие данных факторов существенно усложняет функциональное поведение систем управления производством.

При этом возникновение повреждений и отказов целесообразно рассматривать как случайные события дискретной или непрерывной природы.

Согласно терминологии ГОСТ Р 27.002-2009, надежность представляет собой комплексное свойство, включающее готовность системы управления производством к выполнению функций и детерминирующие его характеристики: безотказность, ремонтпригодность, а также организацию технического обслуживания.

Показатели надежности классифицируются на две категории [172, 153, 77, 92]:

- единичные показатели – характеризуют одно из свойств надежности: безотказность, долговечность, ремонтпригодность или сохраняемость;
- комплексные показатели – описывают характеристики нескольких свойств одновременно.

В практике оценки надежности применяются два фундаментальных метода:

1. Вероятностный (аналитический) метод – базируется на априорных данных о показателях надежности структурных компонентов системы управления производством или их расчетных значениях.
2. Статистический метод – показатели определяются по результатам испытаний и эксплуатационных данных посредством методов математической статистики [163, 109, 25].

Для невосстанавливаемых систем и элементов приоритетными являются показатели безотказности. Ключевым показателем выступает вероятность безотказной работы (ВБР), нормируемая относительно установленной наработки.

ВБР в интервале времени от 0 до t представляет собой характеристику надежности, определяющую вероятность $P(t_0)$ того, что в течение заданной наработки система управления производством сохранит работоспособное состояние. Иными словами, ВБР есть вероятность отсутствия отказа в течение интервала $[0, t]$ при условии, что в начальный момент эксплуатации система управления производством находилась в работоспособном состоянии.

Математическое выражение для ВБР:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad (37)$$

где $F(t)$ – функция распределения времени до первого отказа; $f(t)$ – плотность распределения времени до первого отказа.

Для нормального распределения при выходе параметра за одну из границ допуска: $P(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$. В случае двустороннего выхода за границы функционального допуска: $P(t) = \Phi\left(\frac{t_{\text{верх}}-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_{\text{ниж}}-\mu}{\sigma}\right)$.

При статистической оценке ВБР вычисляется по формуле:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (38)$$

где $N(t)$ – количество элементов системы управления производством, сохранивших работоспособность к моменту времени t ; N_0 – количество работоспособных элементов системы управления производством на начало эксплуатации; $n(t)$ – количество элементов системы управления производством, отказавших к моменту времени t .

Вероятность отказа $Q(t_0)$ представляет собой вероятность возникновения отказа в течение заданной наработки:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t). \quad (39)$$

Средняя наработка до отказа определяется как математическое ожидание наработки до отказа:

$$T_0 = \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt, \quad (40)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа.

При статистической оценке:

$$T_0^* = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (41)$$

где t_i – единичная реализация времени наработки до первого отказа i -го элемента.

Для восстанавливаемых элементов показатели, рассчитываемые до первого отказа, сохраняют свою валидность. Дополнительно вводятся показатели, характеризующие процесс восстановления [212, 213].

Среднее время восстановления определяется по формуле:

$$T_B = \int_0^{\infty} t \cdot g(t) dt, \quad (42)$$

где $g(t)$ – плотность распределения времени восстановления.

Интенсивность восстановления вычисляется как:

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - G(t)}, \quad (43)$$

где $G(t)$ – функция распределения времени восстановления.

Средняя наработка между отказами для восстанавливаемых систем управления производством:

$$T_{\text{м.о.}}^* = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \tau_i, \quad (44)$$

где τ_i – единичная реализация времени наработки между отказами; r – количество отказов.

Коэффициент готовности представляет собой вероятность нахождения элемента в работоспособном состоянии в произвольный момент времени:

$$R(t_0) = \frac{1}{T + \tau + \tau_{\text{ов}}} \int_0^{\infty} [1 - F_H(t)] dt, \quad (45)$$

где $\tau_{\text{ов}}$ – время ожидания восстановления; $F_H(t)$ – функция распределения наработки между отказами.

Дополнительные параметры включают: среднее время ожидания восстановления, среднюю длину очереди на восстановление и другие характеристики системы массового обслуживания [181, 171].

В практике расчетов надежности широко применяются две функции распределения: $F(t)$ – наработка до отказа и $G(t)$ – период восстановления. Обе функции могут следовать экспоненциальному закону распределения или произвольному распределению.

При принятии экспоненциального закона распределения возможно применение формул, вытекающих из теории марковских случайных процессов (МСП) и уравнений Эрланга. В данном случае формулы для расчета ряда показателей надежности восстанавливаемых элементов совпадают с формулами для невозстанавливаемых элементов.

При экспоненциальном распределении с параметром λ вероятность безотказной работы (при условии работоспособности в начальный момент времени) определяется как:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (46)$$

Вероятность отказа:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (47)$$

Наработка до отказа:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}. \quad (48)$$

Среднее время восстановления:

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{\mu}, \quad (49)$$

где μ – параметр потока восстановлений.

Стационарный коэффициент готовности системы управления производством или ее элемента:

$$K_{\text{г}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{T_{\text{м.о.}}}{T_{\text{м.о.}} + T_{\text{в}}} = \frac{1}{1 + a}, \quad (50)$$

где параметр a применяется в формулах для расчета восстанавливаемых элементов системы управления производством $a = \frac{\lambda}{\mu}$. Параметр $K_{\text{г}}$ определяет вероятность выполнения элементом системы своих функций независимо от текущего состояния (работоспособное или неработоспособное).

Стационарный коэффициент простоя:

$$K_{\text{п}} = 1 - K_{\text{г}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{T_{\text{в}}}{T + T_{\text{в}}} = \frac{a}{1 + a}. \quad (51)$$

Коэффициент простоя характеризует относительную долю времени, в течение которой элемент системы управления производством находится в ремонте (без учета времени ожидания в очереди). При отклонении законов распределения $F(t)$ и $G(t)$ от экспоненциальных или при временной зависимости параметров потоков отказов и восстановлений применяются нестационарные коэффициенты готовности и простоя.

Для количественной оценки свойств надежности (долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость) применяются специализированные аналитические или статистические характеристики, систематизированные в нормативно-технической документации [18, 86, 17].

Ресурс – суммарная наработка элемента от начала эксплуатации или ремонта до перехода в предельное состояние. Ресурс может выражаться в единицах времени, километрах пробега, количестве рабочих циклов и иных метриках.

Средний ресурс T_p представляет собой математическое ожидание ресурса для выборки из N элементов:

$$T_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i, \quad (52)$$

где L_i – индивидуальная наработка i -го элемента до предельного состояния.

Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой система управления производством сохраняет работоспособность с вероятностью γ (выражается в процентах).

Срок сохраняемости определяется в единицах календарного времени как суммарная продолжительность хранения и простоя, после которой показатели надежности и функционально-технические характеристики остаются в установленных пределах. Средний и γ -процентный сроки сохраняемости определяются аналогично показателям ресурса.

Существует экономически детерминированное равновесие между:

- системами с низким уровнем безотказности, но высокими затратами на ремонт и обслуживание;
- системами с высоким уровнем безотказности, характеризующимися повышенными затратами на разработку и производство.

Оптимизация данного баланса представляет собой задачу многокритериальной оптимизации в контексте управления жизненным циклом продукции.

При рассмотрении произвольного потока отказов следует отметить, что возникновение каждого отказа переводит элемент или систему управления производством в новое состояние: неработоспособное или промежуточное (при наличии резервирования). Для восстанавливаемых систем управления производством после отказа возможны два состояния:

- ожидание восстановления (нахождение в очереди), если ресурсы восстановления заняты;
- активное восстановление при доступности ресурсов.

В технической практике термин «восстановление» интерпретируется как ремонт (замена отказавших компонентов) или переключение на резервный элемент.

Применение математических методов и имитационного моделирования позволяет с высокой точностью прогнозировать состояние системы управления производством во времени. При упрощающих допущениях (случайный характер отказов и восстановлений, экспоненциальное распределение) используются аналитические формулы.

Данные процессы классифицируются как марковские случайные процессы (МСП). Ключевое свойство МСП – отсутствие последствия: состояние системы в текущий момент не зависит от траектории перехода в данное состояние. Дополнительные допущения:

- потоки отказов являются редкими событиями (вероятность двух и более отказов в малый промежуток времени пренебрежимо мала);

– время восстановления распределено по экспоненциальному закону с плотностью $g(t) = \mu e^{-\mu t}$, где μ – параметр потока восстановлений.

Математическое ожидание и дисперсия времени обслуживания:

$$M[T_B] = \frac{1}{\mu},$$

$$D[T_B] = \frac{1}{\mu^2}.$$

Схема переходов между состояниями включает переходы из состояния в то же самое (за малый промежуток времени состояние не изменилось). Рассмотрим систему управления производством с n элементами и n -канальным резервированием из восстанавливаемых элементов с параметрами: λ – плотность потока отказов, μ – плотность потока восстановлений.

Система имеет $n + 1$ состояний:

- 0 – все элементы работоспособны;
- 1 – один элемент неработоспособен и восстанавливается (система работоспособна);
- k – отказало k элементов, которые восстанавливаются (система работоспособна при $k < n$);
- n – отказали все n элементов, система неработоспособна.

Задача сводится к модели системы массового обслуживания (СМО) с n каналами при ограничении по плотности потока восстановлений.

Вероятности состояний: $P_0(t), P_1(t), \dots, P_k(t), \dots, P_n(t)$. Вероятность $P_0(t)$ соответствует состоянию без отказов, $P_n(t)$ – состоянию полной неработоспособности.

Для состояния 0 за время от t до $t + \Delta t$ возможны два случая:

- все элементы были работоспособны, и за время Δt не произошло ни одного отказа;
- в системе был один отказ, но за промежуток Δt он был устранен.

На основании теоремы о сложении вероятностей несовместных событий:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot (1 - \lambda\Delta t) + P_1(t) \cdot \mu\Delta t.$$

Событие «переход из состояния 1 в состояние 0» является произведением вероятностей независимых событий. Вероятность второго события (при $1 - e^{-\mu\Delta t} \approx \mu\Delta t$):

$$P_{1 \rightarrow 0} = P_1(t) \cdot \mu\Delta t.$$

Тогда:

$$P_0(t + \Delta t) - P_0(t) = -\lambda\Delta t \cdot P_0(t) + \mu\Delta t \cdot P_1(t).$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t).$$

Для любого промежуточного состояния k (соответствующего отказу k элементов) суммарная вероятность пребывания системы управления производством в данном состоянии определяется как сумма вероятностей трех взаимоисключающих событий:

- система сохраняла свое состояние неизменным на рассматриваемом временном интервале, то есть не зафиксировано новых отказов и не завершено обслуживание ни одного из существующих отказов;
- система перешла в состояние k из состояния $k - 1$ вследствие регистрации дополнительного отказа;
- система перешла в состояние k из состояния $k + 1$ в результате завершения восстановления одного из отказавших элементов.

Исходя из изложенного, по аналогии с ранее рассмотренным случаем получаем следующее выражение:

$$P_k(t + \Delta t) = P_k(t) \cdot (1 - k\lambda\Delta t) \cdot (1 - \mu\Delta t) + P_{k-1}(t) \cdot (k - 1)\lambda\Delta t + P_{k+1}(t) \cdot \mu\Delta t.$$

Для состояния $k - 1$ вероятность события, характеризующегося отсутствием как новых отказов, так и завершений процедур восстановления имеющих k отказов, определяется выражением:

$$P_{\text{стаб}} = (1 - k\lambda\Delta t) \cdot (1 - \mu\Delta t).$$

При пренебрежении бесконечно малыми величинами порядка выше первого получаем:

$$P_{\text{стаб}} \approx 1 - (k\lambda + \mu)\Delta t.$$

Следовательно, по аналогии выводим:

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -(k\lambda + \mu)P_k(t) + (k-1)\lambda P_{k-1}(t) + \mu P_{k+1}(t).$$

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -(\lambda + \mu)P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + \mu P_{k+1}(t).$$

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + \mu)P_k(t) + \mu P_{k+1}(t).$$

Вероятность выполнения начальных условий при $t \rightarrow 0$ определяется следующим образом:

$$P_k(0) = \delta_{k,0}.$$

Для терминального состояния (полный отказ всех n элементов системы управления производством) справедливы следующие соотношения:

- $P_{n-1}(t) \cdot (n-1)\lambda\Delta t$ – вероятность перехода системы из состояния $n-1$ в состояние n вследствие возникновения очередного отказа;
- $P_n(t) \cdot (1 - n\mu\Delta t)$ – вероятность сохранения системой состояния n , то есть отсутствия завершения восстановления ни одного из n отказов.

При переходе к дифференциальной форме получаем:

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = (n-1)\lambda P_{n-1}(t) - n\mu P_n(t).$$

В результате формируем полную систему дифференциальных уравнений, описывающую динамику вероятностей состояний:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + \mu)P_k(t) + \mu P_{k+1}(t), \\ \frac{dP_n(t)}{dt} = \lambda P_{n-1}(t) - \mu P_n(t). \end{cases}$$

В данной системе:

- $P_k(t)$ – вероятность нахождения системы управления производством в произвольном состоянии k , определяемая как суперпози-

ция трех событий: сохранение текущего состояния, переход из состояния $k - 1$ вследствие отказа, переход из состояния $k + 1$ вследствие восстановления;

- $P_n(t)$ – вероятность состояния полного отказа всех n элементов;
- λ – интенсивность потока отказов;
- μ – интенсивность потока восстановлений.

Представленная система дифференциальных уравнений известна в литературе как система уравнений Эрланга. Начальные условия задаются следующим образом: $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0, \dots, P_n(0) = 0$.

Вероятность нахождения системы управления производством в неработоспособном состоянии определяется как $P_n(t)$, соответственно, вероятность безотказной работы вычисляется по формуле $P_{\text{бр}}(t) = 1 - P_n(t)$.

При стремлении времени t к достаточно большим значениям вероятности состояний системы асимптотически приближаются к стационарным значениям и практически перестают изменяться. В большинстве практических задач именно этот установившийся режим представляет наибольший интерес, поскольку обеспечивает получение статистически устойчивых характеристик надежности. В стационарном режиме производные в левой части системы уравнений принимают нулевые значения. В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений размерности $n + 1$ с $n + 1$ неизвестными, дополненную условием нормировки:

$$\sum_{k=0}^n P_k = 1.$$

В стационарном режиме система принимает следующий вид:

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ \lambda P_{k-1} - (\lambda + \mu) P_k + \mu P_{k+1} = 0, \\ \lambda P_{n-1} - \mu P_n = 0. \end{cases}$$

Решением данной системы при введении параметра нагрузки $\rho = \lambda/\mu$ являются классические формулы Эрланга:

$$P_k = \frac{\rho^k}{k!} P_0, k = 0, 1, \dots, n.$$

В частном случае при $n = 1$ получаем $P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$. В общем виде вероятность отказа системы управления производством в установившемся режиме равна P_n , а вероятность безотказной работы – $1 - P_n$.

В теории массового обслуживания (ТМО) отдельный класс составляют модели с ожидаемым заявкам в очереди. В таких системах часть заявок, не могут быть обслуженными немедленно, помещается в очередь ожидания. При превышении временем ожидания определенного порогового значения заявка может покинуть систему необслуженной. Применительно к системам управления производством это означает, что отдельные отказавшие элементы могут быть исключены из процесса восстановления при чрезмерной длительности ожидания.

Время предельного ожидания в очереди моделируется как случайная величина с экспоненциальным законом распределения:

$$F_{\text{ож}}(t) = 1 - e^{-\nu t}.$$

В данном выражении параметр ν характеризует интенсивность потока заявок, покидающих очередь без обслуживания. Величина $1/\nu$ соответствует среднему времени ожидания в очереди.

Рассмотрим систему управления, содержащую n элементов. Введем понятие «обслуживающий элемент» (ОЭ) – единица обслуживающего ресурса (сотрудник или группа специалистов), способная выполнить одну операцию восстановления или ремонта одновременно. Пусть в системе доступно w обслуживающих элементов. При превышении количества одновременно отказавших элементов системы над числом w формируется очередь на восстановление.

Количество возможных состояний системы управления производством возрастает. В условиях промышленной практики, как правило, выполняется соотношение $n \gg w$. В этом случае пространство состояний системы может быть описано следующим образом:

- состояние 0 – все элементы системы функционируют нормально;
- состояние 1 – один элемент неработоспособен и находится в процессе восстановления, система сохраняет работоспособность;
- состояние k – где k элементов отказали и восстанавливаются, система работоспособна (при $k < w$);
- состояние w – где w элементов отказали и восстанавливаются, очередь отсутствует ($k = w$);
- состояние $w + 1$ – количество отказавших элементов превысило число ОЭ, один элемент ожидает восстановления ($k = w + 1$);
- состояние $w + s$ – где $w + s$ элементов отказали, из них s элементов находятся в очереди на восстановление.

Первые w уравнений системы совпадают с ранее полученными выражениями для системы без очереди.

Для состояния $w + 1$ получаем следующее выражение для вероятности:

$$P_{w+1}(t + \Delta t) = P_{w+1}(t) \cdot (1 - w\mu\Delta t) \cdot (1 - \nu\Delta t) + P_w(t) \cdot \lambda\Delta t + P_{w+2}(t) \cdot (w\mu + \nu)\Delta t.$$

В данном уравнении:

- $P_w(t) \cdot \lambda\Delta t$ – вероятность перехода из состояния w в состояние $w + 1$ вследствие нового отказа;
- $P_{w+1}(t) \cdot (1 - w\mu\Delta t) \cdot (1 - \nu\Delta t)$ – вероятность сохранения состояния $w + 1$ (отсутствие завершений восстановления и ухода из очереди);
- $P_{w+2}(t) \cdot (w\mu + \nu)\Delta t$ – вероятность перехода из состояния $w + 2$ в состояние $w + 1$ (завершение восстановления или уход заявки из очереди).

Соответствующее дифференциальное уравнение принимает вид:

$$\frac{dP_{w+1}(t)}{dt} = \lambda P_w(t) - (w\mu + \nu)P_{w+1}(t) + (w\mu + \nu)P_{w+2}(t).$$

Для состояния $w + s$ при $s > 0$ выделяются три составляющие вероятности перехода:

$$P_{w+s}(t + \Delta t) = P_{w+s-1}(t) \cdot \lambda\Delta t + P_{w+s}(t) \cdot (1 - w\mu\Delta t) \cdot (1 - \nu\Delta t) + P_{w+s+1}(t) \cdot (w\mu + \nu)\Delta t.$$

$$P_k = \frac{\rho^k}{k!} P_0, k \leq w,$$

$$P_{w+s} = \frac{\rho^w}{w!} \left(\frac{\rho}{w}\right)^s P_0, s > 0.$$

Математическое ожидание числа отказов, ожидающих обслуживания в очереди, определяется выражением:

$$M[L_q] = \sum_{s=1}^{\infty} s \cdot P_{w+s}.$$

После преобразований получаем:

$$M[L_q] = \frac{P_w \cdot \rho}{w - \rho}.$$

Вероятность формирования очереди вычисляется по формуле:

$$P_{оч} = \sum_{s=1}^{\infty} P_{w+s} = \frac{P_w \cdot \rho}{w - \rho}.$$

Параметр ρ/w служит индикатором достаточности обслуживающих ресурсов. При условии $\rho > w$ количество ОЭ недостаточно для своевременного устранения отказов, что приводит к неограниченному росту очереди до достижения критического уровня, при котором система управления становится полностью неработоспособной.

Среднее количество свободных обслуживающих элементов определяется следующим соотношением:

$$M[C] = w - \rho + P_{оч}.$$

Представленные формулы, определяющие процессы обслуживания отказов в СУ, вполне допустимо применять для описания случайных процессов и получать важные для практики расчетные параметры, правильно определять стратегии использования и обслуживания систем управления машиностроительными производствами.

Учет человеческого фактора в модели надежности системы управления машиностроительным производством

В представленной модели оценки надежности параметр потока отказов λ рассматривается как характеристика технической системы, не зависящая от внешних факторов. Однако, значительная часть отказов (по различным оценкам, 20–30%) связана с человеческим фактором: ошибками оператора, вызванными стрессом, усталостью, недостаточной эргономичностью интерфейса.

На основании экспериментальных данных (измерение ЧСС, айтрекинг, время до целевого действия) предлагается модифицировать модель надежности, сделав параметр потока отказов λ функцией от уровня стресса оператора S :

$$\lambda(S) = \lambda_T + \lambda_H(S),$$

где λ_T – базовый параметр потока технических отказов (не зависит от оператора), $\lambda_H(S)$ – параметр потока отказов по вине человека (зависит от уровня стресса S).

Уровень стресса S определяется через измеримые физиологические показатели:

$$S = \frac{HR - HR_{rest}}{HR_{max} - HR_{rest}},$$

где HR – текущая частота сердечных сокращений (ЧСС, уд./мин), HR_{rest} – ЧСС в покое (60–80 уд./мин), HR_{max} – максимальная ЧСС.

Функция $\lambda_H(S)$ аппроксимируется на основании экспериментальных данных:

$$\lambda_H(S) = \alpha \cdot e^{\beta S},$$

где α, β – эмпирические коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов по результатам экспериментов с фокус-группой.

Вероятность безотказной работы системы с учетом человеческого фактора $P_{total}(t)$ определяется как произведение вероятности безотказной работы технической части $P_T(t)$ и вероятности безошибочной работы оператора $P_H(t)$:

$$P_{total}(t) = P_T(t) \cdot P_H(t) = e^{-\lambda_T t} \cdot e^{-\int_0^t \lambda_H(S(\tau)) d\tau}.$$

При постоянном уровне стресса $S = \text{const}$ формула упрощается:

$$P_{total}(t) = e^{-(\lambda_T + \lambda_H(S))t}.$$

Средняя наработка между отказами с учетом человеческого фактора:

$$T_{total} = \frac{1}{\lambda_T + \lambda_H(S)}.$$

В реальности уровень стресса $S(t)$ меняется во времени. В этом случае вероятность безотказной работы вычисляется численным интегрированием:

$$P_{total}(t) = \exp\left(-\lambda_T t - \int_0^t \alpha \cdot e^{\beta S(\tau)} d\tau\right).$$

Соответственно, параметр потока отказов по вине человека $\lambda_H(S)$ для оптимизированного интерфейса уменьшается:

$$\lambda_H^{opt}(S) = k_{opt} \cdot \lambda_H(S),$$

где $k_{opt} \in [0.7, 0.9]$ – коэффициент снижения ошибок за счет оптимизации интерфейса.

В модели системы массового обслуживания (СМО) с очередью на восстановление параметр λ входит в выражения для вероятностей состояний $P_k(t)$. При учете человеческого фактора система дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -\lambda(S)P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P'_k(t) = \lambda(S)P_{k-1}(t) - (\lambda(S) + \mu)P_k(t) + \mu P_{k+1}(t), \\ P'_n(t) = \lambda(S)P_{n-1}(t) - \mu P_n(t), \end{cases}$$

где $\lambda(S) = \lambda_T + \lambda_H(S)$ – модифицированный параметр потока отказов.

В стационарном режиме ($t \rightarrow \infty, P'_k(t) = 0$) решение системы имеет вид:

$$P_k = \frac{\rho^k}{k!} P_0, \text{ где } \rho = \frac{\lambda(S)}{\mu}.$$

Вероятность отказа системы с учетом человеческого фактора:

$$P_{отк}(S) = \frac{\rho^n}{n!} P_0 = \frac{\left(\frac{\lambda_T + \lambda_H(S)}{\mu}\right)^n}{\sum_{k=0}^n \frac{\left(\frac{\lambda_T + \lambda_H(S)}{\mu}\right)^k}{k!}}.$$

Предложена математическая модель надежности системы управления производством с учетом человеческого фактора. Показано, что параметр потока отказов λ зависит от уровня стресса оператора S , который определяется через измеримые физиологические показатели (ЧСС). Интеграция человеческого фактора в модель массового обслуживания позволяет более адекватно оценивать надежность СУ в реальных условиях эксплуатации и обосновывать требования к эргономике интерфейсов.

3.3. Разработка метода организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков

В рамках исследования риски классифицируются на три группы: организационно-управленческие, технологические и технические. Каждая группа рисков влияет на параметры модели надежности и на показатели архитектуры СУ.

Организационно-управленческие риски включают: изменения приоритетов заказов и производственной программы, задержки согласований конструкторской и технологической документации, колебания доступности персонала и оборудования, ошибки планирования и диспетчеризации. В терминах модели надежности данные риски проявляются как нестационарность параметров $\lambda(t), \mu(t)$, увеличение времени ожидания восстановления и рост вероятности формирования очереди на восстановление.

Технологические риски связаны с вариациями длительности операций, переналадками, браком, отклонениями от утвержденных технологических маршрутов, несоответствием между электронной структурой изделия (ЭСИ) и реальной производственной практикой. В модели СУ это приводит к изменению структуры графа процессов, появлению дополнительных переходов между состояниями и росту дисперсии наработки между отказами [108, 83].

Технические риски охватывают отказы станков, роботов, транспортных систем, ограничения пропускной способности участков, сбои в ИТ-инфраструктуре и системах сбора данных. В рамках модели данные риски

непосредственно влияют на интенсивность потока отказов λ , вероятность состояния полного отказа и коэффициент готовности K_r [104, 82].

Таким образом, все три группы рисков могут быть формализованы как факторы, изменяющие параметры λ , μ , w (число обслуживающих элементов) и ν (интенсивность ухода из очереди) в системе уравнений Эрланга и в модели СМО с очередью.

Формализация рисков в модели принятия решений

Элементарная модель принятия решения при выборе конфигурации архитектуры СУ представлена как задача выбора альтернативы из множества допустимых конфигураций на основе критериев надежности и качества. Данные критерии детализированы через показатели ВБР, K_r , $T_{м.о.}$ и другие характеристики.

Для учета рисков модель принятия решений дополняется следующим образом. Пусть $A = \{a_j\}$ – множество допустимых конфигураций архитектуры СУ (варианты резервирования, состав и расположение контроллеров, структура сетей, состав обслуживающих ресурсов). Пусть $R = \{r_i\}$ – множество сценариев реализации рисков, где каждый сценарий r_i задает конкретные значения параметров λ_i , μ_i , ω_i , ν_i , а также, при необходимости, нестационарные законы их изменения во времени.

Для каждой пары (a_j, r_i) может быть рассчитан вектор показателей надежности $K(a_j, r_i)$, включающий: вероятность безотказной работы $P_{бр}(t; a_j, r_i)$, стационарный коэффициент готовности $K_r(a_j, r_i)$, среднюю наработку между отказами $T_{м.о.}(a_j, r_i)$, вероятность образования очереди $P_{оч}(a_j, r_i)$ и другие показатели.

В условиях неопределенности предпочтительной считается конфигурация a^* , обеспечивающая наилучшее значение обобщенного критерия надежности $K_{об}(a_j)$ при множестве сценариев рисков. В простейшем случае обобщенный критерий может быть определен как худшее (минимальное) значение ключевого показателя по всем сценариям:

$$K_{об}(a_j) = \min_i K_{ключ}(a_j, r_i),$$

где $K_{ключ}$ – выбранный ключевой показатель (например, K_c или $P_{бр}(t_{норм})$).

Более общая постановка использует взвешенную свертку по сценариям с коэффициентами p_i , отражающими экспертные оценки вероятностей или важности сценариев:

$$K_{об}(a_j) = \sum_i p_i K_{ключ}(a_j, r_i).$$

Таким образом, задача выбора конфигурации архитектуры СУ трансформируется в задачу оптимизации в условиях рисков:

$$a^* = \operatorname{argmax}_{a_j \in A} K_{об}(a_j).$$

Данная постановка напрямую связывает критерии надежности с организационно-управленческими, технологическими и техническими рисками.

Метод организации производства в условиях рисков

На основе представленной формализации формулируется метод организации производства в условиях рисков. Метод предназначен для выбора конфигурации архитектуры СУ и параметров организации производственного процесса, обеспечивающих заданный уровень устойчивости к рискам.

Метод включает следующие основные этапы.

1. Формирование множества сценариев рисков R .

На данном этапе на основе анализа производственной системы, данных эксплуатации и экспертных оценок формируется набор сценариев r_i , каждый из которых описывает возможную реализацию организационно-управленческих, технологических и технических рисков. Сценарии могут задаваться детерминированно (фиксированные значения $\lambda_i, \mu_i, \omega_i, \nu_i$) или вероятностно (распределения параметров).

2. Оценка показателей надежности для каждой конфигурации архитектуры СУ. Для каждой конфигурации $a_j \in A$ и каждого сценария $r_j \in R$ рассчитываются показатели надежности $K(a_j, r_i)$ с использованием следующей модели: системы уравнений Эрланга для состояний системы, формул для

$K_r, P_{отк}, M[L_q]$ и других характеристик. При необходимости учитывается нестационарность параметров и человеческий фактор через зависимость $\lambda(S)$.

3. Формирование обобщенного критерия надежности. На основе полученных значений $K(a_j, r_i)$ формируется обобщенный критерий $K_{об}(a_j)$ по одному из рассмотренных выше правил. Выбор правила зависит от принятой стратегии отношения к риску (пессимистическая, нейтральная, оптимистическая).

4. Выбор конфигурации архитектуры СУ. Конфигурация a^* выбирается как решение задачи оптимизации:

$$a^* = \operatorname{argmax}_{a_j \in A} K_{об}(a_j).$$

5. Полученная конфигурация обеспечивает наилучшее сочетание показателей надежности при множестве реализаций рисков и, следовательно, является устойчивой к их влиянию.

6. Формирование рекомендаций по организации производства. На основе анализа чувствительности показателей $K(a_j, r_i)$ к параметрам рисков формируются рекомендации по организации производства: необходимый уровень резервирования критических элементов, состав и количество обслуживающих ресурсов w , допустимые уровни загрузки участков, требования к времени восстановления μ , приоритеты в очереди на восстановление. Данные рекомендации могут быть использованы при планировании производства, техническом обслуживании и развитии архитектуры СУ.

Псевдокод алгоритма реализации метода

Для однозначной реализации предложенного метода в составе СППР целесообразно представить его в виде алгоритма. Ниже приведен псевдокод.

Вход:

- $A = \{a_j\}$ – множество конфигураций архитектуры СУ;
- $R = \{r_i\}$ – множество сценариев рисков;
- для каждого r_i : параметры $\lambda_i, \mu_i, \omega_i, \nu_i$ (при необходимости – законы изменения во времени);

- правило формирования обобщенного критерия $K_{об}$;
- при необходимости – модель зависимости $\lambda(S)$ для учета человеческого фактора.

Выход:

- a^* – робастная конфигурация архитектуры СУ;
- $K_{об}(a^*)$ – значение обобщенного критерия;
- рекомендации по организации производства (w^* , уровни резервирования, требования к μ и др.).

1. Алгоритм. Выбор робастной конфигурации архитектуры СУ в условиях рисков
- 2.
3. 1. Для каждого сценария $r_i \in R$ выполнить:
4. 1.1. Задать параметры потока отказов и восстановлений:
5. $\lambda \leftarrow \lambda_i, \mu \leftarrow \mu_i, w \leftarrow w_i, v \leftarrow v_i$.
6. При учете человеческого фактора вычислить $\lambda(S) = \lambda_T + \lambda_H(S)$.
7. 1.2. Для каждой конфигурации $a_j \in A$ выполнить:
8. 1.2.1. Сформировать систему уравнений Эрланга / СМО с очередью
9. для параметров λ, μ, w, v и структуры a_j .
10. 1.2.2. Решить систему в стационарном режиме ($dp_k/dt = 0$)
11. с условием нормировки $\sum p_k = 1$.
12. 1.2.3. Вычислить показатели надежности $K(a_j, r_i)$:
13. – вероятность безотказной работы $P_{бр}(t)$;
14. – стационарный коэффициент готовности K_r ;
15. – среднюю наработку между отказами $T_{м.о.}$;
16. – вероятность образования очереди $P_{оч}$;
17. – при необходимости – другие показатели из 3.2.
18. 1.2.4. Сохранить вектор $K(a_j, r_i)$.
- 19.
20. 2. Для каждой конфигурации $a_j \in A$ выполнить:
21. 2.1. На основе множества $\{K(a_j, r_i)\}_i$ сформировать
22. обобщенный критерий $K_{об}(a_j)$ по заданному правилу:
23. – минимакс: $K_{об}(a_j) = \min_i K_{ключ}(a_j, r_i)$;
24. – взвешенная свертка: $K_{об}(a_j) = \sum_i p_i K_{ключ}(a_j, r_i)$;
25. – иное правило по выбору разработчика.
- 26.
27. 3. Найти робастную конфигурацию:
28. $a^* \leftarrow \arg \max_{a_j \in A} K_{об}(a_j)$.
- 29.
30. 4. На основе анализа чувствительности $K(a_j, r_i)$ к параметрам
31. λ, μ, w, v сформировать рекомендации по организации производства:
32. – требуемое число обслуживающих элементов w^* ;
33. – необходимый уровень резервирования критических элементов;
34. – требования к параметру потока восстановлений μ ;
35. – допустимые уровни загрузки участков и приоритеты в очереди.
- 36.
37. 5. Вернуть $a^*, K_{об}(a^*)$ и сформированные рекомендации.

Данный алгоритм может быть реализован как вычислительный модуль в составе аналитической платформы. В этом случае сценарии рисков формируются на основе данных о производственной системе и ЭСИ.

Интеграция данного метода в СППР позволяет перейти от разовых расчетов надежности к систематической поддержке принятия решений по организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков.

3.4. Обобщенная структура системы поддержки принятия решений для выбора конфигурации архитектуры системы управления производством

Разрабатываемая СППР будет обрабатывать данные из источников и отчетов [310, 9, 64]. Ввиду отсутствия высокой загруженности данными и сложных многоуровневых запросов к данным, хранилище имеет смысл спроектировать на реляционной системе управления базами данных (СУБД).

Для реализации СППР следует сделать выбор с пользу реляционной СУБД, поскольку она обеспечивает быстрый доступ к данным, высокую вертикальную масштабируемость, а также обеспечивает консистентность данных [99]. В рамках настоящей работы сделан выбор в пользу PostgreSQL, потому что для нее не требуется лицензии (СУБД с открытым и бесплатным исходным кодом), а также она поддерживает геоинформационные данные (расширение PostGIS) [26, 220, 28, 30].

Оркестраторы представляют собой инструменты ПО, разработанные для управления и координации выполнения сложных вычислительных задач и процессов. Они используются для автоматизации и оркестрации различных компонентов и сервисов в распределенных средах, таких как облачные вычисления, кластеры данных и центры обработки данных [99, 26].

Оркестраторы предназначены для управления жизненным циклом выполнения задач, включая планирование, запуск, мониторинг, отслеживание и управление зависимостями между различными компонентами системы. В настоящей работе в качестве оркестратора ETL-процессов выбран Apache Airflow.

Разделение внутренней архитектуры хранилища данных на слои позволяет четко разделить места хранения и упростить архитектуру системы управления производством. Каждый последующий уровень абстрагирован от сложностей внутренней реализации предыдущего, что позволяет избежать потери данных или ухудшения качества данных в случаях, когда данные из источников и данные пользователя могут приходить с разной периодичностью,

Концепция разделения данных на слои представлена на рисунок 37.

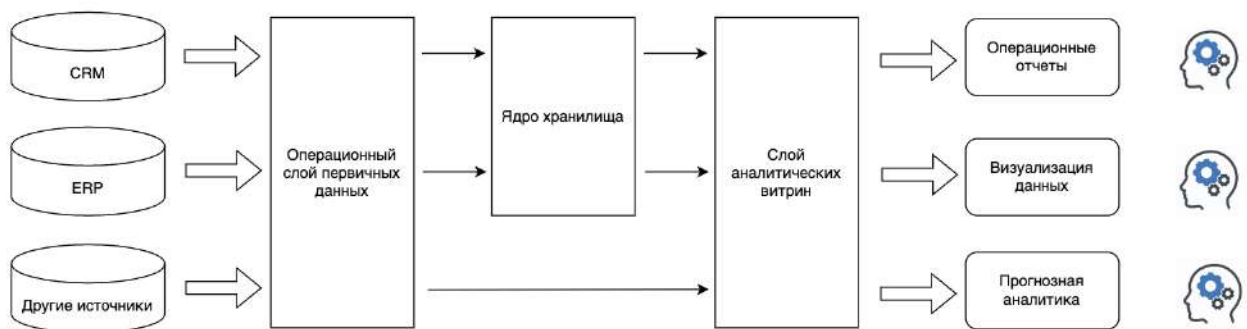


Рисунок 37 - Представление DWH в виде слоев данных

В классических DWH выделяют три основных слоя данных: первичный слой, слой данных и слой витрин [198].

Операционный слой первичных данных (Primary Data Layer, raw или staging), на котором выполняется загрузка информации из систем-источников в исходном качестве и сохранением полной истории изменений. На этом слое происходит абстрагирование следующих слоев хранилища от физического устройства источников данных, способов их сбора и методов выделения изменений.

Ядро хранилища (Core Data Layer) – центральный слой, в котором происходит консолидация данных из разных источников, приводя их к единым структурам и ключам. Здесь происходит основная работа с качеством данных и происходят трансформации, чтобы абстрагировать потребителей от особенностей логического устройства источников данных и необходимости их взаимного сопоставления.

Слой аналитических витрин (Data Mart Layer), где данные преобразуются к структурам, удобным для анализа. Витрина данных (Data Mart) представляет собой срез хранилища данных в виде массива тематической, узконаправленной информации.

Данные, поступающие из источников, сохраняются в операционном слое первичных данных, отделяющим их от остальной системы. Ввиду того, что источники открытые и независимые, данные в них обновляются с разной периодичностью. Данные из источников собираются парсером, который собирает необходимую информацию из исходного кода и перекладывает в операционный слой. Частота запуска парсера для каждого источника зависит от частоты обновления источника.

В детальном (центральном) слое хранилища данные из операционного слоя первичных данных обрабатываются ETL-процессом преобразования данных, который состоит из следующих этапов:

1. Извлечение данных (Extraction - E) из одного или нескольких источников и подготовка их к преобразованию (загрузка в промежуточную область, проверка данных на соответствие спецификациям и возможность последующей загрузки в ХД);
2. Трансформация данных (Transform -T) - преобразование форматов и кодировки, агрегация и очистка;
3. Загрузка данных (Load L) - запись преобразованных данных, включая информацию о структуре их представления (метаданные) в необходимую систему хранения (DWH) или витрину данных.

Ввиду отсутствия подготовки данных на источниках, а также по причине их неоднородности и ненормализованности, в настоящей работе предлагается использовать ETL-подход. С помощью детальной области, в которой данные из источников нормализуются и преобразовываются, можно ускорить работу модели. ETL-процесс перекладывает обработанные данные первичного слоя в детальный слой в схему «detail_src».

Слой аналитических витрин отбирает данные из детального слоя и перекладывает их в таблицу. Данная витрина взаимодействует одновременно и с ядром хранилища, и с геоаналитической моделью, которая производит расчет значений целевой функции для каждой альтернативной комбинации признаков и возвращает данные с рассчитанной оценкой.

Все элементы СППР упакованы в Docker-контейнер для автоматизации развертывания и управления приложениями в средах с поддержкой контейнеризации. Оно позволяет «упаковать» приложение со всем его окружением и зависимостями в контейнер, который может быть развернут на любой системе с поддержкой контрольных групп в ядре [41, 174, 191].

При запуске Docker-образа, формируется верхний слой, который впоследствии можно будет изменить. Образ можно собрать с нуля или загрузить уже созданные образы и, впоследствии обновить их.

Таким образом, СППР в виде дистрибутива устанавливается пользователем, при этом пользователю не нужно специальное программное обеспечение, библиотеки и установленные инструменты.

Описанная архитектура СППР схематично представлена на рисунок 38.

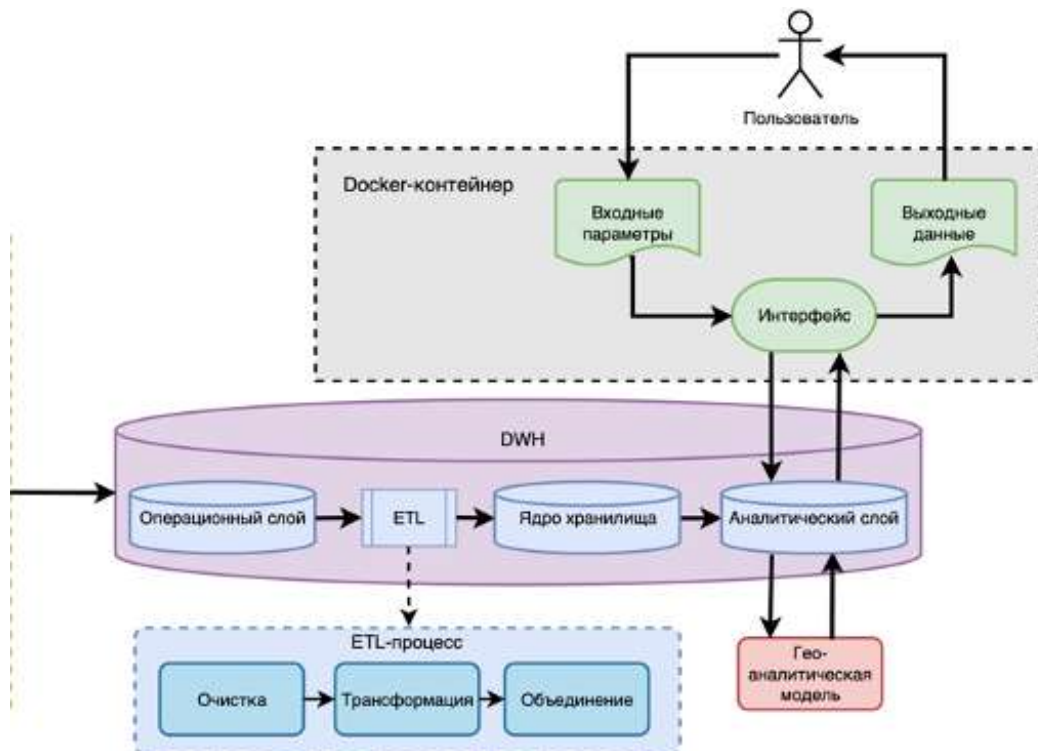


Рисунок 38 - Схема системной архитектуры СППР

3.5 Методы нормализации данных и свертка критериев оценки системы управления производством

Нормализация данных является необходимым этапом оценки качества системы управления производством. Она позволяет привести частные критерии к сопоставимому безразмерному виду и устранить влияние различий в единицах измерения, диапазонах и порядках величин. Показатели также могут иметь различный характер статистического распределения, содержать выбросы и задаваться в виде нормативных, интервальных или нечетких значений. Без приведения частных критериев к единой шкале их непосредственная свертка является математически некорректной. В этом случае результат агрегирования может зависеть не столько от фактического состояния системы управления, сколько от выбранных единиц измерения и масштаба отдельных показателей.

В настоящей работе система управления машиностроительным производством рассматривается как многоуровневая структура, включающая совокупность взаимосвязанных информационных систем предприятий и их функциональных подсистем. В соответствии с этим представлением совокупность критериев оценки системы управления предприятием или сети предприятий может быть представлена в виде многоуровневого многомерного циклического графа. Его вершины соответствуют частным критериям, информационным системам, функциональным подсистемам, подразделениям и предприятиям, а ребра отражают отношения подчинения, информационного обмена, функциональной зависимости и обратной связи.

Пусть x_{ij} – исходное значение j -го частного критерия для i -го объекта оценки, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, J}$; n – число объектов или наблюдений; J – число частных критериев. Нормированное значение критерия обозначим через z_{ij} . В дальнейшем предполагается, что увеличение z_{ij} соответствует улучшению состояния системы управления, а все нормированные значения, предназначенные для свертки, приведены к единой шкале $[0; 1]$.

В существующих исследованиях [85, 118, 125, 279] нормализация обычно рассматривается как процедура, включающая выбор набора данных, используемых для определения параметров преобразования, и применение математического оператора или метрики для расчета нормированного значения. Однако такое представление не устанавливает формального порядка выбора конкретного метода нормализации. В результате один и тот же показатель может нормироваться различными способами на разных предприятиях или в разные периоды времени, что снижает воспроизводимость и сопоставимость результатов.

В связи с этим в настоящей работе нормализация рассматривается как трехэтапная процедура:

1. диагностика исходных данных;
2. выбор метода нормализации с учетом свойств данных и последующей схемы свертки;
3. верификация результата и оценка устойчивости итогового ранжирования.

На этапе диагностики определяются тип измерительной шкалы, направленность показателя, форма распределения, наличие аномальных наблюдений, нормативных или технологических границ, а также требования к последующей свертке. На втором этапе выбирается метод нормализации. На третьем этапе проверяются сохранение порядка объектов, полнота целевой шкалы, разрешающая способность и устойчивость итоговой оценки.

Нормализация по среднему значению

Нормализация по среднему значению, или Mean normalization, заключается в центрировании исходных данных относительно среднего значения:

$$z_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j, \quad (53)$$

где

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$$

– среднее значение j -го критерия.

Формула (53) позволяет определить отклонение конкретного значения от средней тенденции показателя. Этот метод может использоваться для анализа отклонений производительности оборудования, длительности производственного цикла, уровня загрузки или других параметров относительно среднего состояния.

Вместе с тем данный метод устраняет только сдвиг относительно среднего значения и не устраняет различия масштабов и единиц измерения. Поэтому значения z_{ij} сохраняют размерность исходного показателя. Нормализация по среднему не может непосредственно применяться для свертки разнородных критериев и используется преимущественно как подготовительное преобразование.

Min-max-нормализация

Min-max-нормализация преобразует исходные значения в заданный диапазон. Для критерия-стимулятора, увеличение которого повышает качество системы управления, используется выражение:

$$z_{ij}^{(+)} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, \quad 0 \leq z_{ij}^{(+)} \leq 1, \quad (54.1)$$

где $x_j^{\min}$ и $x_j^{\max}$ – нижняя и верхняя границы диапазона j -го критерия.

Для критерия-дестимулятора, увеличение которого снижает качество системы управления, применяется обратное преобразование:

$$z_{ij}^{(-)} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, \quad 0 \leq z_{ij}^{(-)} \leq 1 \quad (54.2)$$

К показателям-стимуляторам могут относиться коэффициент готовности оборудования, производительность, доля своевременно выполненных заказов и уровень доступности информационных ресурсов. К показателям-дестимуляторам относятся длительность простоев, уровень брака, время реакции на управляющее воздействие, затраты и продолжительность производственного цикла.

Min-max-нормализация сохраняет порядок исходных значений и линейные соотношения между ними. Поэтому она удобна для последующей аддитивной свертки. Однако метод чувствителен к выборочным экстремумам. Если минимальное или максимальное значение обусловлено случайным выбросом, основная масса наблюдений может быть сжата в узком интервале, что снижает разрешающую способность шкалы.

Для ограничения влияния отдельных экстремальных значений используется предварительное ограничение исходного показателя:

$$\tilde{x}_{ij} = \min\{\max\{x_{ij}, x_j^{\min}\}, x_j^{\max}\}$$

После этого значение $\tilde{x}_{ij}$ подставляется в формулу (54). Однако применение такого ограничения приводит к потере информации о степени выхода за установленные границы. Поэтому при наличии нормативных нарушений дополнительно фиксируются величина и продолжительность превышения допустимого уровня.

Z-нормализация

Z-нормализация, или стандартизация, приводит значения показателя к нулевому среднему и единичному стандартному отклонению:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, \quad (55)$$

где

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$$

– выборочное стандартное отклонение j -го критерия.

Полученное значение интерпретируется как отклонение исходного показателя от среднего уровня, выраженное в единицах стандартного отклонения. Метод целесообразен для количественных критериев с различными единицами измерения и масштабами, если среднее значение и стандартное отклонение адекватно характеризуют исследуемую совокупность.

Для критерия-дестимулятора направление может быть изменено следующим образом:

$$z_{ij}^{(-)} = -\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}.$$

В отличие от min-max-преобразования, Z-нормализация не ограничивает результат интервалом $[0; 1]$. Поэтому перед аддитивной или мультипликативной сверткой необходим дополнительный этап приведения к ограниченной шкале.

Следует отметить, что обычная Z-нормализация не является устойчивой к выбросам, поскольку среднее значение и стандартное отклонение изменяются под влиянием экстремальных наблюдений. При наличии выбросов используется робастная стандартизация, рассмотренная далее.

Сигмоидная нормализация

Сигмоидная нормализация выполняет нелинейное преобразование и отображает неограниченную числовую ось в интервал $(0; 1)$:

$$q_{ij} = \frac{1}{1 + \exp \left[-\alpha \left(\frac{x_{ij} - c_j}{s_j} \right) \right]}, \quad 0 < q_{ij} < 1, \quad (56)$$

где c_j – центр преобразования; $s_j > 0$ – масштабный параметр; $\alpha > 0$ – параметр крутизны сигмоидальной функции.

В качестве c_j может использоваться среднее значение, медиана или нормативное значение показателя. Для критерия-дестимулятора используется обратная форма:

$$q_{ij}^{(-)} = \frac{1}{1 + \exp \left[\alpha \left(\frac{x_{ij} - c_j}{s_j} \right) \right]}$$

Сигмоидное преобразование целесообразно применять при необходимости ограничить влияние экстремальных значений или описать нелинейную зависимость между исходным показателем и качеством системы управления. При этом значения, расположенные в центральной части распределения, сохраняют большую различимость, а значения в границах интервала значений

постепенно сближаются с границами интервала. Поэтому сигмоидная нормализация может снижать разрешающую способность при сравнении предприятий-лидеров и предприятий-аутсайдеров.

Робастное линейное масштабирование

Для снижения зависимости результата от случайных выбросов вместо фактических минимума и максимума используются квантили:

$$z_{ij}^R = \frac{\min\{\max\{x_{ij}, P_{j,05}\}, P_{j,95}\} - P_{j,05}}{P_{j,95} - P_{j,05}}, \quad 0 \leq z_{ij}^R \leq 1, \quad (57)$$

где $P_{j,05}$ и $P_{j,95}$ – 5-й и 95-й процентиля j -го критерия.

Этот метод применяется при наличии выбросов или нестабильных экстремальных значений. Его недостатком является искусственное отождествление всех значений ниже 5-го процентиля и выше 95-го процентиля с граничными значениями шкалы.

Для критерия-дестимулятора робастное преобразование выполняется в обратном направлении:

$$z_{ij}^{R(-)} = \frac{P_{j,95} - \min\{\max\{x_{ij}, P_{j,05}\}, P_{j,95}\}}{P_{j,95} - P_{j,05}}.$$

Робастная стандартизация

Робастная стандартизация основана на медиане и медианном абсолютном отклонении:

$$z_{ij}^{RM} = \frac{x_{ij} - \text{med}(x_{.j})}{1,4826 \cdot \text{MAD}(x_{.j})},$$

где

$$\text{MAD}(x_{.j}) = \text{med}_i(|x_{ij} - \text{med}(x_{.j})|).$$

Медиана $\text{med}(x_{.j})$ является устойчивой характеристикой центральной тенденции, а $\text{MAD}(x_{.j})$ – устойчивой оценкой разброса. Коэффициент 1,4826 обеспечивает сопоставимость данной оценки с классическим стандартным отклонением для нормального распределения.

Робастная стандартизация применяется при наличии больших значений границ интервала, выраженной асимметрии и значительной доли аномальных

наблюдений. Если $\text{MAD}(x_{.j}) = 0$, вместо него используется межквартильный размах либо положительная малая константа ε .

Нормирование по эталону

Если для критерия установлены нормативное, проектное или технологическое значения, параметры нормирования задаются не составом выборки, а внешними требованиями. Для критерия-стимулятора используется:

$$z_{ij}^{E(+)} = \text{clip}\left(\frac{x_{ij} - x_j^{\text{доп}}}{x_j^{\text{эт}} - x_j^{\text{доп}}}, 0, 1\right), \quad x_j^{\text{эт}} > x_j^{\text{доп}},$$

а для критерия-дестимулятора:

$$z_{ij}^{E(-)} = \text{clip}\left(\frac{x_j^{\text{доп}} - x_{ij}}{x_j^{\text{доп}} - x_j^{\text{эт}}}, 0, 1\right), \quad x_j^{\text{эт}} < x_j^{\text{доп}},$$

где

$$\text{clip}(u, 0, 1) = \min\{\max\{u, 0\}, 1\}.$$

Эталонному значению соответствует единица, а предельно допустимому – ноль. Нормирование по эталону обеспечивает сопоставимость оценок между предприятиями и отчетными периодами, поскольку не зависит от текущих выборочных минимумов и максимумов. Поэтому данный оператор является приоритетным при межзаводских и межпериодных сравнениях.

Для критериев, которые имеют нечеткий, экспертный или нормативно-интервальный характер, нормализация числовых значений недостаточна. В этом случае необходимо определить степень соответствия фактического состояния объекта желательному состоянию.

Пусть $\mu_j(x_{ij})$ – функция принадлежности, характеризующая степень соответствия значения x_{ij} требованиям по j -му критерию. Тогда нормированное значение задается выражением:

$$z_{ij} = \mu_j(x_{ij}), 0 \leq \mu_j(x_{ij}) \leq 1.$$

Значение 0 соответствует полному несоответствию требованиям, а значение 1 – полному соответствию или оптимальному состоянию.

Для критерия-стимулятора с нижней допустимой границей a_j и целевым значением b_j применяется линейная функция:

$$\mu_j^{(+)}(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq a_j \\ \frac{x_{ij} - a_j}{b_j - a_j}, & a_j < x_{ij} < b_j \\ 1, & x_{ij} \geq b_j \end{cases}$$

Для критерия-дестимулятора используется обратная функция:

$$\mu_j^{(-)}(x_{ij}) = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq a_j \\ \frac{b_j - x_{ij}}{b_j - a_j}, & a_j < x_{ij} < b_j \\ 0, & x_{ij} \geq b_j \end{cases}$$

Если оптимальным является попадание показателя в определенный интервал, применяется трапецевидная функция принадлежности:

$$\mu_j(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq a_j \\ \frac{x_{ij} - a_j}{b_j - a_j}, & a_j < x_{ij} < b_j \\ 1, & b_j \leq x_{ij} \leq c_j \\ \frac{d_j - x_{ij}}{d_j - c_j}, & c_j < x_{ij} < d_j \\ 0, & x_{ij} \geq d_j \end{cases}$$

Здесь $[b_j, c_j]$ – интервал оптимальных значений, а $[a_j, d_j]$ – интервал допустимых значений.

Если качество показателя снижается при отклонении от целевого значения c_j в обе стороны, может использоваться гауссовская функция:

$$\mu_j(x_{ij}) = \exp \left[-\frac{(x_{ij} - c_j)^2}{2\sigma_j^2} \right],$$

где σ_j определяет допустимую степень отклонения от целевого значения.

Нормализация функций принадлежности применяется для экспертных оценок, лингвистических переменных, показателей с нормативными интервалами и критериев, для которых зависимость качества управления от исходного

значения является нелинейной. Параметры функций a_j , b_j , c_j и d_j определяются на основании технологических регламентов, проектных требований, статистики функционирования предприятий и экспертных оценок.

Нормализация порядковых и бинарных критериев

Для показателей, заданных в порядковых шкалах, применение среднего значения и стандартного отклонения нецелесообразно, если расстояния между градациями не имеют количественной интерпретации. В этом случае используется ранговое отображение:

$$z_{ij} = \frac{r_{ij} - 1}{R_j - 1}, \quad 0 \leq z_{ij} \leq 1,$$

где r_{ij} – ранг объекта по j -му критерию; R_j – число градаций или рангов.

Для бинарного критерия нормированное значение задается непосредственно:

$$z_{ij} \in \{0,1\},$$

где 1 означает наличие требуемого свойства или выполнение условия, а 0 – его отсутствие.

Диагностические признаки и правила выбора оператора

Выбор оператора нормализации для j -го критерия осуществляется на основании следующих диагностических признаков:

- D_1 – тип измерительной шкалы: метрическая, порядковая или бинарная;
- D_2 – форма распределения, оцениваемая по коэффициенту асимметрии A_j , коэффициенту эксцесса E_j и, при необходимости, критерию Шапиро–Уилка;
- D_3 – наличие аномальных наблюдений;
- D_4 – наличие нормативных, проектных или технологических границ;
- D_5 – требования последующей схемы свертки.

Доля аномальных наблюдений определяется как:

$$\delta_{\text{out},j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{1}(x_{ij} \notin [Q_{1j} - 1,5 IQR_j, Q_{3j} + 1,5 IQR_j]),$$

где Q_{1j} и Q_{3j} – первый и третий квартили; $IQR_j = Q_{3j} - Q_{1j}$; $\mathbf{1}(\cdot)$ – индикаторная функция.

Наличие нормативных границ задается бинарным признаком:

$$\gamma_j = \begin{cases} 1, & \text{если установлены } x_j^{\text{эт}} \text{ и/или } x_j^{\text{доп}}, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Требования к шкале определяются видом свертки:

- аддитивная свертка требует $z_{ij} \in [0; 1]$;
- мультипликативная свертка требует $z_{ij} \in (0; 1]$;
- методы, основанные на расстоянии до идеальной точки, могут использовать стандартизованные значения при условии единого направления критериев.

Правила выбора на основании указанных признаков представлены в приложении Н.

Приоритетным является правило R_1 , поскольку нормативное нормирование обеспечивает независимость от текущего состава выборки. Если нормативные границы отсутствуют, оператор выбирается по типу шкалы и диагностическим характеристикам данных.

Если условиям удовлетворяют несколько методов, выбор осуществляется по формальному критерию качества нормализации. Для каждого метода $m \in M$ рассчитываются следующие показатели.

Сохранение порядка объектов:

$$I_1(m) = \rho_S(x_{\cdot j}, z_{\cdot j}^{(m)}),$$

где ρ_S – коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Полнота попадания в целевую шкалу:

$$I_2(m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{1}(0 \leq z_{ij}^{(m)} \leq 1).$$

Нормированная разрешающая способность:

$$I_3(m) = \frac{\text{sd}(z_{\cdot j}^{(m)})}{\max_{r \in M} \text{sd}(z_{\cdot j}^{(r)})},$$

где $\text{sd}(\cdot)$ – стандартное отклонение нормированных значений.

Устойчивость ранжирования:

$$I_4(m) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \tau_K^{(b)}(m),$$

где B – число бутстреп-подвыборок; $\tau_K^{(b)}(m)$ – коэффициент ранговой корреляции Кендалла между ранжированиями, полученными на полной выборке и b -й бутстреп-подвыборке.

Итоговый выбор оператора выполняется по выражению:

$$m^* = \operatorname{argmax}_{m \in M} [\lambda_2 I_2(m) + \lambda_3 I_3(m) + \lambda_4 I_4(m)], \#(79)$$

при ограничениях:

$$\lambda_2 \geq 0, \lambda_3 \geq 0, \lambda_4 \geq 0, \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1,$$

и условии сохранения порядка:

$$I_1(m) \geq \rho_{\min},$$

где $\rho_{\min}$ – минимально допустимое значение ранговой корреляции. В практических расчетах может использоваться $\rho_{\min} = 0,99$. При наличии совпадающих рангов допускается снижение данного порога, что должно быть отражено в паспорте нормализации.

Значения весов λ_2 , λ_3 и λ_4 устанавливаются в зависимости от назначения оценки. При рейтинговании предприятий приоритет отдается устойчивости ранжирования, а при оперативном управлении – разрешающей способности шкалы.

Алгоритм нормализации частных критериев

Предложенный метод реализуется в следующей последовательности (Приложение К).

Шаг 1. Формирование паспорта критерия. Для каждого критерия фиксируются его наименование, единица измерения, источник данных, периодичность получения, тип измерительной шкалы, направленность, наличие

нормативных границ и принадлежность к определенному уровню многоуровневого графа.

Шаг 2. Предварительная обработка. Выполняются проверка пропущенных значений, контроль однородности выборки, выявление дублирующихся записей и документирование аномальных наблюдений. Аномальные значения не исключаются автоматически, поскольку они могут отражать реальные организационно-технические события.

Шаг 3. Диагностика данных. Рассчитываются среднее значение, медиана, стандартное отклонение, межквартильный размах, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса и доля наблюдений, выходящих за границы интервала Тьюки.

Шаг 4. Определение направленности. Устанавливается, является ли критерий стимулятором, дестимулятором или показателем с целевым интервалом. Для дестимуляторов применяется обратное преобразование.

Шаг 5. Выбор множества допустимых операторов. На основании правил R_1 – R_8 формируется множество M допустимых операторов.

Шаг 6. Расчет нормированных значений. Выбранный оператор применяется к исходным значениям критерия. Для нечетких показателей рассчитывается функция принадлежности.

Шаг 7. Согласование со схемой свертки. Проверяется ограниченность значений интервалом $[0; 1]$, единое направление критериев и отсутствие недопустимых нулевых значений в мультипликативной части.

Шаг 8. Верификация результата. Проверяются сохранение порядка, полнота шкалы, разрешающая способность и устойчивость ранжирования.

Шаг 9. Анализ чувствительности. Интегральные оценки рассчитываются для выбранного оператора и ближайшей альтернативы. При существенном изменении ранжирования результаты фиксируются как зона методической неопределенности и подвергаются содержательной интерпретации.

Шаг 10. Документирование. В паспорте нормализации указываются выбранный оператор, параметры преобразования, база нормирования, период ее формирования, правила обновления и вид последующей свертки.

Документирование особенно важно при тиражировании методики на разветвленной сети машиностроительных предприятий. При использовании выборочной базы нормирования каждое предприятие может получить собственную шкалу, что затрудняет сравнение между предприятиями. Поэтому для сопоставлений между предприятиями в разные периоды времени рекомендуется централизованно устанавливать нормативную или квантильную базу нормирования и пересматривать ее по утвержденному регламенту. Для оперативного мониторинга приоритет следует отдавать нормативному нормированию, не зависящему от текущего состава выборки.

Нормализация данных позволяет оптимизировать процесс анализа данных, повысить точность результата, уменьшить влияние различий в масштабах значений признаков на работу алгоритма и обеспечить более стабильную и эффективную работу модели [61, 269, 280, 89, 102, 11]. Пример графика нормированных данных представлены на рисунке 39.

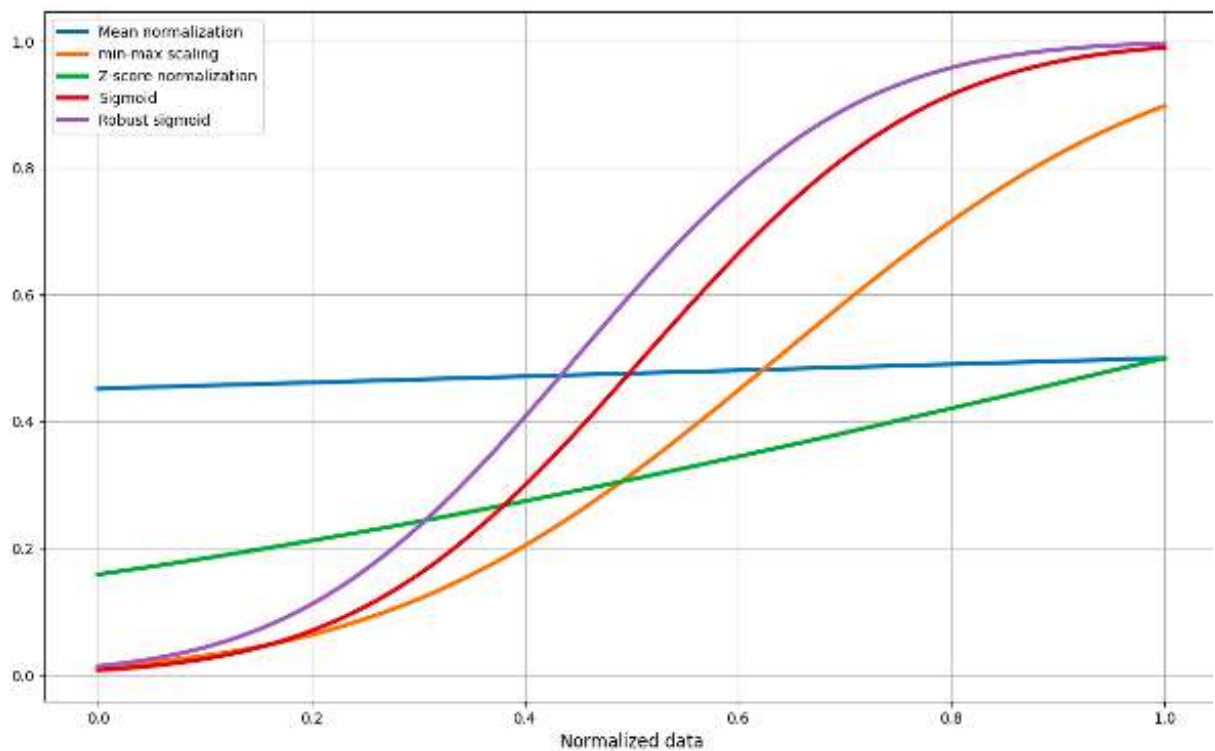


Рисунок 39 – Пример нормализации данных различными методами

В рамках настоящей работы выбран метод Z-нормализации (стандартизации) ввиду нескольких причин:

1. Это позволяет избежать потери информации о различиях в значениях при нормализации;
2. Z-нормализация основана на центрировании и масштабировании данных относительно среднего и стандартного отклонения, что делает ее менее чувствительной к выбросам;
3. Z-нормализация позволяет интерпретировать значения данных в стандартных единицах (стандартных отклонениях от среднего), что облегчает понимание влияния различных факторов на результаты анализа.
4. Z-нормализация ориентирована на асимметричные данные и подходит для моделей, предполагающих нормальность распределения. σ -робастная нормализация, напротив, применяется в моделях с выбросами и асимметричным распределением.

Каждый показатель должен входить в целевую функцию с определенным весовым коэффициентом, позволяющим определить «стоимость», важность показателя в общем множестве показателей. Для определения значений весовых коэффициентов существует несколько методов [88, 20, 116].

Метод ранжирования [16] базируется на экспертных оценках специалистов в соответствующей области. Группа экспертов n определяет важность m частных показателей, присваивая им ранги: наиболее важному показателю соответствует высший ранг, следующему — и так далее, при этом наименее важный показатель получает ранг, равный 1. Итоги опроса сводятся в таблицу, где в последней строке указывается сумма рангов, присвоенных экспертами. Весовые коэффициенты рассчитываются по формуле (59):

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^m r_j}, \quad j = \overline{1, m} \quad (59)$$

где w_j – весовой коэффициент j -го показателя, r_j – ранг j -го показателя, m – количество показателей.

Преимущества: вычислительная простота. Недостатки: необходимость проведения опроса экспертов, определения их количества и квалификации.

Метод приписывания баллов [62], в отличие от ранжирования, предполагает, что эксперты выставляют баллы от 0 до 10 в зависимости от важности показателя. При этом допускается использование дробных значений и присвоение одинаковых баллов разным показателям. Затем для каждого эксперта определяется вес показателя по формуле (60):

$$r_{ij} = \frac{h_{ij}}{\sum_{j=1}^m h_{ij}}, \quad j = \overline{1, m} \quad (60)$$

где r_{ij} - вес j -го показателя, определенный i -м экспертом, h_{ij} - балл i -го эксперта, выставленный j -му показателю, m – количество показателей.

Окончательные весовые коэффициенты вычисляются по формуле (61):

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (61)$$

где n – число экспертов.

Метод приписывания баллов не сложнее ранжирования, но предоставляет экспертам большую свободу в оценках.

Помимо экспертных оценок, для определения весовых коэффициентов можно применять формальные методы, учитывающие числовые значения показателей. Например, **числовой способ**.

Для каждого показателя вычисляется коэффициент относительного разброса δ_i по формуле (62):

$$\delta_i = \frac{x_i^{max} - x_i^{min}}{x_i^{max}} \quad (62)$$

где x_i^{max} , x_i^{min} – максимальное и минимальное значения i -го показателя соответственно.

Весовые коэффициенты принимают наибольшие значения для тех критериев, у которых относительный разброс наиболее значителен (63):

$$w_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^m \delta_i} \quad (63)$$

где m – число показателей.

Метод анализа иерархий (МАИ) также применяется для получения весовых коэффициентов [76]. Его суть заключается в построении матриц парных сравнений для показателей, сгруппированных по смысловым категориям.

Матрица парных сравнений A квадратная обратно симметричная матрица с единицами на главной диагонали. Значения под диагональю получаются делением соответствующих значений над диагональю, и наоборот [148]. Каждый показатель в строке сравнивается со всеми показателями в столбцах. Значения элементов матрицы от 1 до 9 представляют собой девять степеней важности одного критерия по сравнению с другим, причем, пять значений являются основными (1, 3, 5, 7, 9) и четыре – промежуточными значениями (2, 4, 6, 8). Элементы матрицы принимают значения от 1 до 9, представляющие девять степеней важности одного критерия относительно другого. Пять основных значений (1, 3, 5, 7, 9) и четыре промежуточных (2, 4, 6, 8) присваиваются по принципу:

- 1 – показатели равнозначны;
- 3 – показатель в строке слегка предпочтительнее показателя в столбце;
- 5 – показатель в строке средне предпочтительнее;
- 7 – показатель в строке сильно предпочтительнее;
- 9 – показатель в строке полностью доминирует.

Если рассматриваемый критерий менее важен, чем сравниваемый, используются обратные величины: 1, 1/2, 1/3, ..., 1/9.

При заполнении матрицы парных сравнений экспертом могут быть допущены погрешности в определении относительной важности показателей. Для определения степени корректности данных в заполненной матрице используют понятие меры согласованности.

Согласованность положительной обратно симметричной матрицы эквивалентна равенству ее максимального собственного значения λ_{max} порядку матрицы n ($\lambda_{max} \geq n$) [24]. Приближенное значение λ_{max} вычисляется по алгоритму:

1. Умножить матрицу парных сравнений справа на вектор относительных весов w : $A * w = P$;
2. Разделить каждую компоненту вектора P на соответствующую компоненту вектора весов w , получив новый вектор $P'_i = P_i/w_i$;
3. среднее значение компонент нового вектора – приближенное значение λ_{max} : $\lambda_{max} \approx \frac{\sum P'_i}{n}$.

Чем ближе λ_{max} к n , тем более согласована матрица. Отклонение от согласованности выражают индексом согласованности $CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$. Случайный индекс (RI) — индекс согласованности случайно сгенерированной обратно симметричной матрицы со значениями от 1 до 9: $RI = \frac{1,98(n-2)}{n}$. Отношение индекса согласованности к случайному индексу является отношением согласованности: $CR = CI/RI$. Если $CR \leq 0,1$, то уровень несогласованности матрицы сравнений приемлемым, если $CR > 0,1$, то уровень несогласованности матрицы сравнений высокий.

Метод модифицированной первой главной компоненты строит интегральный показатель y в виде линейной свертки $y = \sum_{i=1}^m w_i \tilde{x}_i$, где w_i – весовые коэффициенты, $w_i \geq 0$ ($i = \overline{1, m}$), m – количество исходных показателей, $\tilde{x}_i$ – унифицированные значения частных показателей, если выполняется условие $\frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \geq 0.55$, где λ_1 – наибольшее собственное значение ковариационной матрицы K частных показателей.

Весовые коэффициенты w_i определяются по формуле (64):

$$w_i = C_i^2 \quad (64)$$

где компоненты вектора $C = (C_1, C_2, \dots, C_p)^T$ являются компонентами собственного вектора ковариационной матрицы K , соответствующего наибольшему собственному значению матрицы λ_1 .

Если условие линейной свертки не выполняется, то набор показателей разбивается на k групп по принципу (65):

$$k = \min_{2 \leq i \leq m-1} \{i: \frac{\lambda_1 + \dots + \lambda_i}{\lambda_1 + \dots + \lambda_m} \geq 0.55\} \quad (65)$$

Для каждой группы весовые коэффициенты вычисляются по описанной схеме. Итоговый интегральный показатель рассчитывается по формуле: $y = 1 - d$, где d – взвешенное евклидово расстояние от объекта до эталона $\mathcal{E} = (1; 1; \dots; 1)$ в пространстве показателей $y_1, y_2, \dots, y_k$ (66):

$$d = \sqrt{\sum_{j=1}^k q_j (y_j - 1)^2} \quad (66)$$

Здесь весовые коэффициенты q_j определяются пропорционально выборочным дисперсиям.

Недостатки метода: высокая трудоемкость; условие линейной свертки зависит от собственных значений ковариационной матрицы, которая определяется конкретными числовыми значениями показателей.

Основной недостаток перечисленных методов — необходимость экспертной оценки, что исключает полную объективность определения весовых коэффициентов. Эта проблема решается в методе CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation) [107].

Метод CRITIC определяет важность критерия через межкритериальную корреляцию. Для оценки различий критериев используются стандартные отклонения значений в столбцах и коэффициенты корреляции всех парных столбцов.

Алгоритм метода CRITIC следующий:

Шаг 1. Задается матрица нормализованных показателей $X = [\xi_{ij}]_{m \times n}$ (67):

$$X = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \dots & \xi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{m1} & \dots & \xi_{mn} \end{bmatrix} \quad (67)$$

где C – столбцы матрицы (показатели), ξ - значение показателя, A – строки матрицы (альтернативные варианты).

Шаг 2. Для показателя C_j ($j = 1, 2, \dots, n$) определяется стандартное отклонение σ_j , представляющее меру отклонения значений альтернатив для данного показателя от среднего. Это отклонение учитывается при дальнейшем определении весовых коэффициентов.

Шаг 3. Из матрицы нормализованных показателей $X = [\xi_{ij}]_{m \times n}$ выделяется вектор (68):

$$\xi_j = (\xi_{1j}, \xi_{2j}, \dots, \xi_{mj}) \quad (68)$$

Вектор ξ_j содержит альтернативные значения A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) для заданного показателя C_j ($j = 1, 2, \dots, n$). Далее собирается матрица $L = [l_{jk}]_{n \times n}$, содержащая коэффициенты линейной корреляции векторов ξ_k и ξ_k . Чем больше расхождение между значениями показателей для альтернатив j и k , тем меньше значение коэффициента l_{jk} .

$$\varphi_j = \sum_{k=1}^n (1 - l_{jk}) \quad (69)$$

Выражение (69) представляет собой меру конфликта показателя j по отношению к другим критериям.

Количество информации W_j , содержащихся в рамках показателя j , определяется умножением следующим образом (70):

$$W_j = \sigma_j * \varphi_j = \sigma_j * \sum_{k=1}^n (1 - l_{jk}) \quad (70)$$

Чем больше значение W_j , тем более весомым считается показатель.

Шаг 4. Объективные значения критериев вычисляются по формуле (71):

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{k=1}^n \sigma_k} \quad (71)$$

где σ_j - стандартное отклонение, рассчитанное на 2 шаге.

Недостаток метода: если стандартное отклонение для критерия близко к нулю, все значения для этого критерия приближаются к среднему, и он не влияет на выбор.

Данную проблему решили авторы [219], модифицировав метод CRITIC (CRITIC-M). В CRITIC-M корректируются объективные значения критериев (72):

$$w_j = \frac{\frac{\bar{\xi}_j}{1 - \bar{\xi}_j} * \sigma_j}{\sum_{j=1}^n (\frac{\bar{\xi}_j}{1 - \bar{\xi}_j} * \sigma_j)} \quad (72)$$

где $\bar{\xi}_j$ - арифметическое среднее элементов показателя j матрицы нормализованных показателей, $\bar{\xi}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \xi_{ij}$.

Введение средних значений позволяет повысить весовые коэффициенты для тех показателей, которые имеют средние значения, близкие к 1. Таким образом вносится определенная доля субъективизма в объективную методологию метода CRITIC.

В рамках данной работы используется метод определения весовых коэффициентов CRITIC-M, так как данный метод не использует экспертных оценок, а значит является объективным [19, 7].

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

Для построения СППР при выборе конфигурации архитектуры системы управления машиностроительным производством разработана модель принятия решений, которая позволяет подучать заключение о доказываемом положении с учетом оценки вероятности факта и опыта, что позволяет увеличить разнообразие принимаемых решений.

Для оценки надежности информационной архитектуры, необходимо представить систему управления производством как совокупность множества элементов, параметры которых являются случайными величинами, распределенные по различным законам. Для нахождения показателей надежности можно использовать вероятностный и статистический методы. Показатели надежности в целом определяются на основе методов теории вероятностей с использованием данных о плотностях потоков отказов, видах и характеристиках функций распределения отказов во времени (в течение наработки). Если элемент

СУ является невосстанавливаемым по тем или иным причинам, то основным показателем надежности будет вероятность безотказной работы. Для восстанавливаемых элементов можно дополнительно использовать показатели, характеризующие процесс восстановления такие как: среднее время восстановления, интенсивность восстановления, средняя наработка между отказами. Важным показателем восстанавливаемых элементов считается коэффициент оперативной готовности к исполнению установленных функций в произвольный момент времени. Для определения показателей по таким свойствам надежности как долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость применять соответствующие аналитические или статистические характеристики.

Нормализация данных является важным шагом в анализе критериев. Можно использовать различные методы нормализации данных и применять их: нормализация среднего, масштабирование Min-max, нормализация Z-показателя, сигмовидная и робастная сигмовидная. Важно отметить, что выбор метода нормализации должен основываться на специфике конкретного исследования и требованиях к данным. В качестве критериев анализа наиболее подходящим методом является нормализация Z-нормализация, поскольку он наиболее устойчив к стохастическим выбросам в выборке данных. Для значимого анализа могут также потребоваться другие методы и подходы, такие как агрегирование данных, расчет показателей и статистический анализ.

Задача нормализации больших выборок статистических данных, отражающих поведение нелинейных систем, нетривиальна из-за огромного влияния множества факторов на их значения. Однако проведение любого комплексного анализа, учитывающего взаимное влияние параметров различной природы, невозможно без такой процедуры взаимного приведения факторов к общим показателям.

Представлена обобщенная архитектура информационной системы для анализа данных о критериях оценки СУ. Разработана база данных, которая является частью архитектуры системы управления производством. Ее сущности позволяет собирать ответы пользователей для проведения экспертных оценок

при определении весовых коэффициентов при свертке критериев на всех уровнях графа. Так же в соответствующих сущностях будет собираться и обрабатываться информация о первоначальных значениях критериев, нормированных данных, агрегированных данных, что позволит проводить многомерный анализ на макро и микромасштабе различными методами.

Архитектура базы данных для оценки критериев качества и надежности информационных архитектур промышленных предприятий состоит из десяти сущностей, каждая из которых содержит необходимую информацию для сбора, анализа, хранения и обработки данных для оценки. Представленная архитектура позволяет оценить каждый элемент СУ машиностроительным производством и вывести обобщенный суперкритерий качества и надежности информационной архитектуры для всего предприятия в целом.

ГЛАВА 4. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ПРОДУКЦИИ

4.1. Формализация требований к системе управления производством на внешнем уровне представления

Опираясь на результаты анализа предметной области, выполненного в предыдущих разделах, формулируются обобщенные требования к функциональному составу системы управления производством, то есть к тем операциям и сервисам, которые она должна обеспечивать в рамках решаемых задач [81, 13, 21, 23, 43].

В процессе взаимодействия с системой управления производством пользователь может получать сведения о характеристиках рассматриваемого текста. Источником такого текста может выступать локальный файл, веб-ресурс либо текст, вводимый пользователем непосредственно в интерфейсе системы. Для корректного определения приоритетов при проектировании и использовании системы необходимо принимать во внимание [59]:

- уровень владения пользователями компьютерными технологиями и наиболее типичные сценарии эксплуатации системы;
- состав необходимой информации, моменты ее востребованности и ожидаемые результирующие данные;
- применяемые технологии разработки и целевую программно-аппаратную платформу, на которой функционируют рабочие места пользователей.

Структура алгоритма лемматизации представлена на рисунке 40.

Алгоритм вычисления значений в соответствии с законом Ципфа используется для оценки степени естественности текстов. На его вход подаются два параметра: число употреблений наиболее частотного слова и общее количество слов в тексте. Далее, в цикле по индексу от 1 до общего числа слов рассчитываются эталонные значения как отношение количества вхождений

наиболее употребляемого слова к номеру итерации; полученные значения последовательно записываются в результирующий массив. Схема алгоритма расчета значений по закону Ципфа приведена на рисунке 41.



Рисунок 40 – Алгоритм лемматизации

Алгоритм предварительной обработки текста включает несколько последовательных этапов. На первом этапе исходный текст разбивается на отдельные слова с использованием регулярных выражений. Далее из множества полученных слов формируется массив стоп-слов, перечень которых считывается из внешнего файла. Для оставшихся слов выполняется лемматизация, в результате чего они приводятся к нормальной словарной форме. На заключительном этапе производится подсчет частоты встречаемости слов в тексте. Структура алгоритма предварительной обработки текста представлена на рисунке 42.

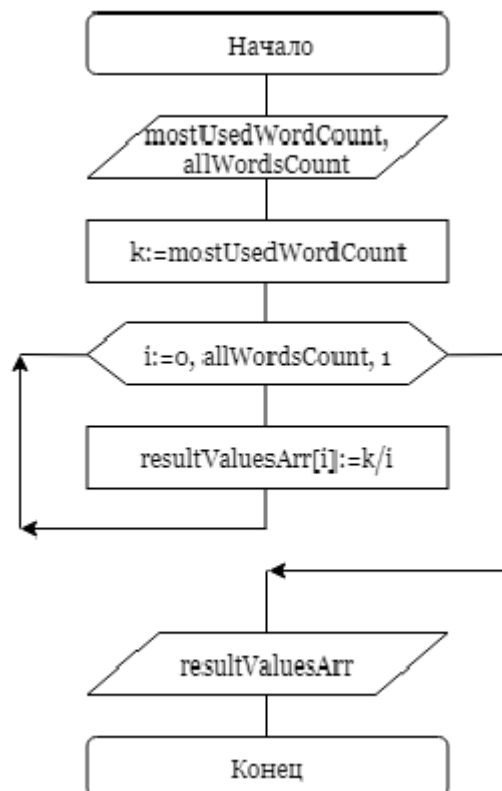


Рисунок 41 – Алгоритм расчета значений по закону Ципфа

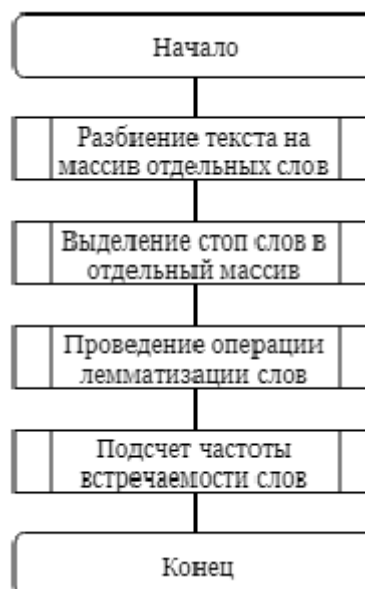


Рисунок 42 – Алгоритм предварительной обработки текста

Для оценки применения поиска оптимального решения по Парето (Pareto simulated annealing) при проектировании интерфейса проведено исследование

трех вариантов интерфейса А, В и С. В таблице представлено количество элементов интерфейса для каждого варианта, длина маршрута блуждания взгляда пользователя, ЧСС, время до целевого действия.

Интерфейс А состоит из 17 элементов, из них 9 – это активные элементы. Среднее значение длины маршрута блуждания взгляда пользователя составляет 42 см, среднее значение ЧСС составляет 87 уд/мин, время до целевого действия 12 сек.

Интерфейс В состоит из 14 элементов, из них 6 – это активные элементы. Среднее значение длины маршрута блуждания взгляда пользователя составляет 34 см, среднее значение ЧСС составляет 83 уд/мин, время до целевого действия 9 сек.

Интерфейс В состоит из 16 элементов, из них 8 – это активные элементы. Среднее значение длины маршрута блуждания взгляда пользователя составляет 38 см, среднее значение ЧСС составляет 83 уд/мин, время до целевого действия 13 сек.

Было проведено 10 экспериментов для каждого вида интерфейса А, В, С. Результаты эксперимента показали, что различное количество элементов интерфейса и описывающих их характеристик показали, что снижение числа элементов интерфейса приводит к увеличению скорости принятия решения.

Поскольку алгоритм выставляет приоритет оптимизации: сначала минимизируется длина маршрута блуждания взгляда, а затем уровень стресса, потом время до целевого действия. Во всех случаях алгоритм сначала оптимизирует длину маршрута блуждания взгляда, а при увеличении числа итераций алгоритм пытается оптимизировать и уровень стресса. Увеличение числа итераций приводит к оптимизации уровня стресса и времени до целевого действия. Оптимизированная компоновка элементов интерфейса разместила все активные элементы по горизонтали в верхнем ряду. В результате оптимизации компоновки элементов интерфейса по Парето приводится к горизонтальному расположению вверху, удалены информационно-избыточные активные элементы такие как: справка, отчистить (рисунок 43).

Характеристика	Значение	Оптимальное значение	Рекомендация
Количество символов	1082	–	–
Количество слов	132	–	–
Количество уникальных слов	86	–	–
Вода	9,68%	0-15%	OK
Академическая тошнота	3,79%	0-7%	OK
Классическая тошнота	2,2	0-7	OK

Рисунок 43 – Пример оптимизированного интерфейса формы просмотра результатов, вкладка «Общая статистика»

Для проведения исследования была сформирована фокус-группа в количестве 20 человек и поставлена задача, которую необходимо решить с использованием незнакомой для них СУ. В качестве оцениваемых критериев были выбраны: быстрота выполнения задания, уровень стресса, легкость поиска необходимой информации, ошибки из-за путанности в системе.

Среднее время выполнения задания составило 17,65 мин. Распределение времени выполнения задания среди респондентов представлено на рисунке 44. Как видно из диаграммы, большинство респондентов 80% справилось с заданием в течении 15-20 минут.

Уровень стресса, который испытывают респонденты при выполнении задания, измеряется так называемым индексом стресса. Изменения сердечного ритма или пульса позволяет сделать вывод о наличии стрессового состояния. Существует множество разнообразных методик измерения и расчета индекса стресса. Одна из них заключается в том, что необходимо регулярно измерять пульс и отслеживать его изменения в динамике. Полученные значения интерпретируются следующим образом: постоянные незначительные изменения пульса – стресса нет; редкие и значительные изменения пульса – легкое стрессовое состояние; постоянные значительные изменения – сильный стресс.

Нужно учитывать, что сердечный ритм менее 50 - 60 ударов в минуту говорит о брадикардии, в пределах от 60 до 80 – нормокардия, более 80 - тахикардия.

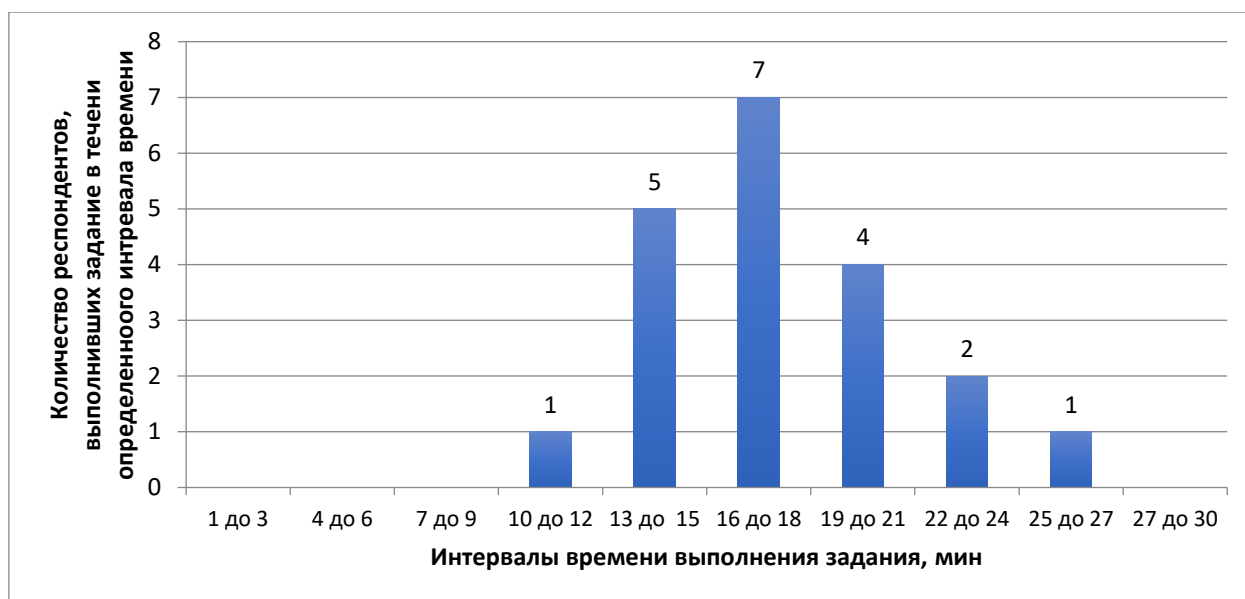


Рисунок 44 - Распределение времени выполнения задания

Результат непрерывного измерения ЧСС показал, что среднее значение ЧСС респондентов в покое составляет 74 уд./мин. В течении выполнения задания наблюдалось значительное повышение ритма на 37,8% от нормы, т.е. до 102 уд./мин. в среднем на 20-й минуте у большинства респондентов (рисунок 45). Так же во временном интервале от 4-й до 8-й минуты теста наблюдается повышение ЧСС на 22,9% (до 91 уд./мин). На рисунке 46 представлена диаграмма изменений средних значений ЧСС и выделены моменты, когда наблюдается тахикардия. Такие изменения значений ЧСС свидетельствует о том, что респонденты в эти моменты испытывают легкое стрессовое состояние.

Временные интервалы, в которых фиксировалось стрессовое состояние, коррелирует с испытываемыми трудностями при поиске необходимой информации в СУ и совершаемыми ошибками, что видно было при наблюдении за движением мыши на экране и движением глаз.

Для измерения критерия, который описывает то, насколько легко искать необходимую информацию в системе управления производством при выполнении задания, использовалось наблюдение за поведением респондентов. В частности, траектория движения глаз в те моменты, когда респондент испытывал стресс в интервале времени от 4 минуты до 8, показывала блуждание

взгляда с периодической непродолжительной фиксацией на элементах интерфейса. Однако при этом целевых действий не происходило, что заметно при наблюдении за движением мыши. Одновременно наблюдалось нарастание пульса, до момента, пока респондент не находил нужную информацию. Таким образом, отсутствие действий и блуждание взгляда в сочетании с нарастанием пульса свидетельствуют об испытываемых трудностях при выполнении задания. Т.е. интерфейс и логика действий в ИС спроектированы недостаточно понятно и очевидно.

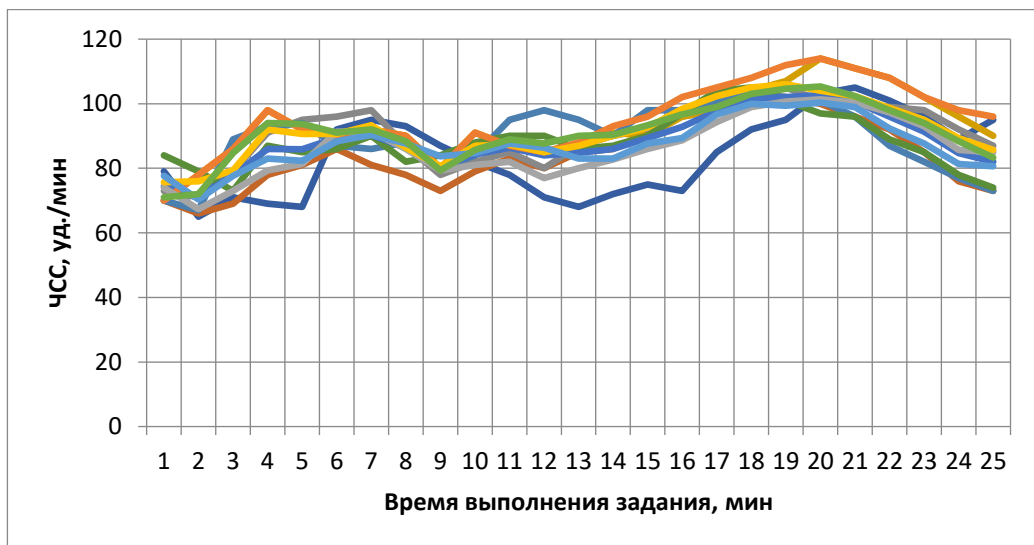


Рисунок 45 - Значение ЧСС у респондентов во время выполнения задания

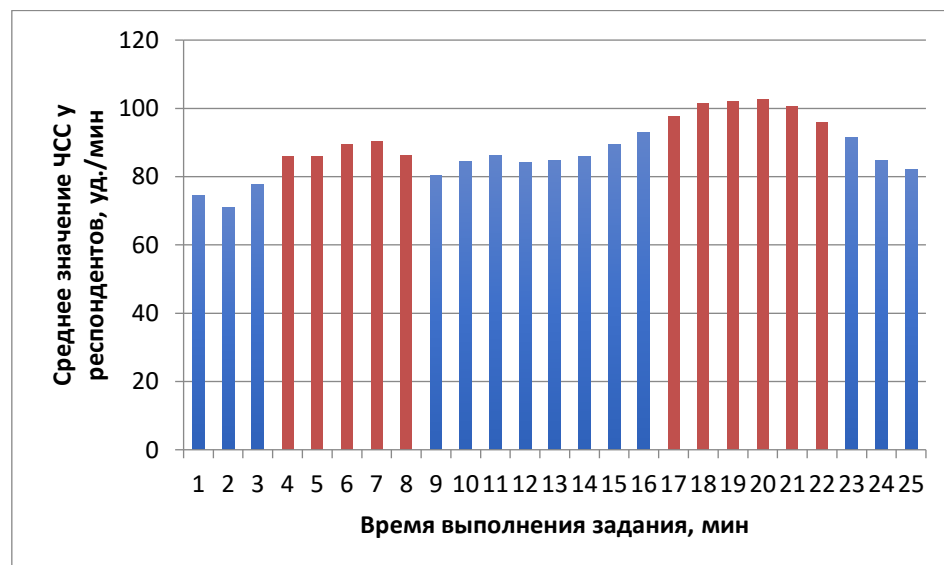


Рисунок 46 - Изменение среднего значения ЧСС во время выполнения задания

У 15% респондентов во время выполнения задания также наблюдалось совершение ошибок, что приводило к более длительному выполнению задания, более 22 минут, при том что среднее время выполнения составило 17,65 мин. Ошибкой при выполнении задания считалось неверное действие или последовательность действий. Выявление ошибочного поведения так же осуществлялось с помощью наблюдении за движением мыши на экране и движением глаз. Уровень стресса у этих респондентов был более выраженным и длительным, что показано на рисунке 47.

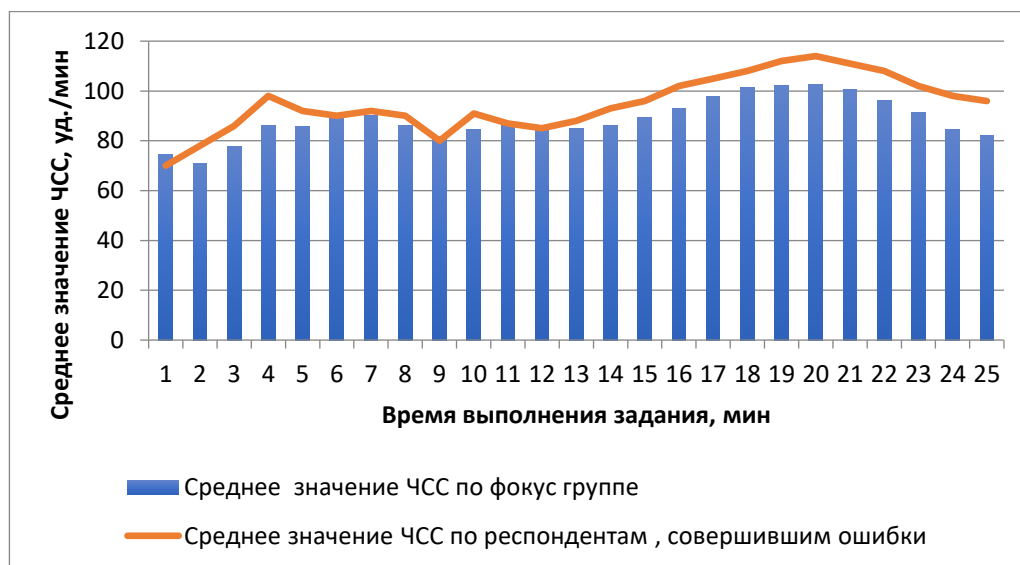


Рисунок 47 - Среднее значение ЧСС

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- для повышения эффективности взаимодействия пользователей с СУ необходимо усовершенствовать интерфейс и логику поведения в системе;
- важную информацию сделать более выраженной и упростить к ней доступ,
- во избежание совершения ошибок пользователями оптимизировать логическую структуру действий в системе.

Таким образом использование методов таких, как измерение ЧСС и айтрекинг, в сочетании с наблюдением за движением мыши на экране, дают возможность более объективно оценить критерии, связанные с взаимодействием человека и системы управления производством.

Анализ возможности применения технологий для измерения комплекса критериев для оценки позволяет выявить недостатки интерфейса и заложенной логики действий в системе управления производством, которые приводят к ошибкам и трудностям при решении поставленной задачи у 75% пользователей и вызывают повышение уровня стресса в среднем на 34,6%.

Проведена оптимизация дизайна интерфейса СУ по когнитивным критериям с использованием метода комбинаторной оптимизации по Парето. Выявлена оптимальная компоновка элементов интерфейса, при котором среднее значение длины маршрута блуждания взгляда стремится к минимальному, ЧСС в пределах нормы, время до целевого действия также стремится к минимальному.

4.2. Оценка качества концептуального уровня системы управления производством

Модели и алгоритмы являются составной частью информационной системы и относятся к ее концептуальному уровню представления. На данном уровне определяются способы обработки информации, принятия решений и формирования управляющих воздействий. В случае системы управления машиностроительным производством алгоритмы обеспечивают решение задач маршрутизации, планирования, распределения ресурсов, календарного планирования и оперативного управления производственными процессами.

Поэтому оценка качества информационной системы должна включать оценку не только ее интерфейсных и технических характеристик, но и качества используемых моделей и алгоритмов. В настоящей работе качество алгоритма оценивается по трем основным показателям: точности получаемого решения, скорости выполнения и объему используемой памяти. Для формального сравнения алгоритмов в качестве тестовой задачи используется задача коммивояжера, моделирующая задачу построения оптимального маршрута между заданным множеством пунктов.

Вектор показателей может быть представлен следующим образом:

$$\mathbf{K}_{\text{alg}} = (K_{\text{acc}}, K_{\text{time}}, K_{\text{mem}}),$$

где K_{acc} – показатель точности решения; K_{time} – показатель скорости работы; K_{mem} – показатель ресурсоемкости по памяти.

При этом точность должна максимизироваться, время работы должно минимизироваться, объем памяти должен минимизироваться.

Поэтому для сопоставления алгоритмов их можно привести к безразмерной шкале. Например, показатель точности эвристического алгоритма относительно эталонного решения определяется как:

$$K_{\text{acc}}^{(a)} = \frac{L_{\text{opt}}}{L_a}, \quad 0 < K_{\text{acc}}^{(a)} \leq 1,$$

где L_{opt} – длина оптимального маршрута, полученная точным алгоритмом; L_a – длина маршрута, полученная исследуемым алгоритмом a .

Эквивалентно можно использовать относительное отклонение:

$$\Delta_L^{(a)} = \frac{L_a - L_{\text{opt}}}{L_{\text{opt}}} \cdot 100\%.$$

Чем меньше значение $\Delta_L^{(a)}$, тем выше точность алгоритма.

Показатель скорости можно определить как:

$$K_{\text{time}}^{(a)} = \frac{T_{\text{ref}}}{T_a},$$

где T_a – время выполнения исследуемого алгоритма; T_{ref} – базовое время, выбранное для сопоставления. При этом для анализа лучше сохранять и исходное время T_a , поскольку отношение к базовому алгоритму не всегда удобно для интерпретации.

Показатель эффективности использования памяти определяется:

$$K_{\text{mem}}^{(a)} = \frac{M_{\text{ref}}}{M_a},$$

где M_a – объем памяти, используемый алгоритмом a ; M_{ref} – базовый объем памяти.

В качестве эталона точности используется длина маршрута, полученная точным алгоритмом при условии, что его выполнение завершается за допустимое время и не превышает доступный объем памяти. Для малого количества

решений эталонное решение определяется точными алгоритмами. Для большого количества возможных решений используется лучшее найденное решение с обязательным указанием, что его оптимальность не доказана.

Для сравнения выбранных алгоритмов было проведено несколько экспериментов, варьирующих сложность и тип задачи коммивояжера. На основе матрицы расстояний были составлены наборы по 3-26 точек заказа [91, 155].

Все эксперименты были выполнены на персональном компьютере с 64 разрядной ОС Windows 10 с процессором Intel Core i3-7100U с тактовой частотой 2,40 ГГц и 4 ГБ оперативной памяти. Алгоритмы были реализованы на языке Python. Во время расчета каждым из алгоритмов фиксируются время работы алгоритма T , протяженность полученного маршрута L . Также замеряются значения пикового и текущего объема памяти, необходимого для решения задачи при малой (10x10) и большой (26x26) выборке точек, и рассчитываются средние отклонения от эталонного значения длины пути $L_{\text{откл.}}$ (эталоном считаем длину пути, рассчитанную МВГ).

Эксперименты с МВГ проводились до 20 точки включительно, т.к. время на выполнение программы экспоненциально росло с увеличением количества точек N . Общее количество вычислительных экспериментов для получения средних значений показателей: 20 экспериментов для МВГ; 26 экспериментов для ГА и МА (таблица 7).

Из таблицы заметна тенденция: при увеличении количества точек время, необходимое для поиска маршрута, между алгоритмами распределяется неравномерно. На малых выборках (до 10 точек включительно) быстрее всего работает МВГ, он же дает оптимальное значение. Медленнее всего работает ГА, однако рассчитанные им длины маршрутов практически совпадают с эталонными значениями, средние отклонения минимальны. МА выбирает самые длинные маршруты, но работает быстрее, чем ГА.

На больших выборках (от 11 точек) МА находит оптимальные маршруты быстрее, чем ГА, а длина маршрутов становится приближенной к оптимальной (до тех пор, пока возможно определение времени работы программы для МВГ, т.е. до 20 точек).

По рисунку 49 можно проследить работу алгоритмов в отношении длины маршрута. Видна конкуренция между МА и ГА в промежутке от 10 до 16 точек, однако с дальнейшим ростом N маршруты, которые находит МА, заметно короче тех, которые находит ГА. Отметим, что до 16 точек оба эвристических алгоритма выдавали решение, близкое к эталонному, а МА продолжил находить приближенные к оптимальному маршруты и до 20 точек.

Временная сложность работы алгоритмов представлена на рисунке 48. Явно замечен экспоненциальный рост времени, необходимого МВГ для поиска оптимального маршрута. Конкуренцию между ГА и МА по близости найденного маршрута к оптимальному можно проследить на рисунке 50.

Средние значения пикового и текущего объема памяти, необходимого рассматриваемым алгоритмам для решения задачи с разными наборами точек, представлены в таблице 8. Текущий объем памяти определяется в конце работы программы, на этапе, когда она выдает результат.

Из таблицы 8 видно, что наиболее ресурсоемким в значении текущего объема памяти является МА: и для малых, и для больших наборов точек значения максимальны среди всех рассматриваемых алгоритмов. Пиковый объем памяти для всех алгоритмов для малого набора точек практически равен. Объем памяти, необходимой МВГ и ГА и в моменты максимальной нагрузки, и в конце работы программы приблизительно одинаков.

Стоит отметить, что МВГ в сравнении для большой выборки точек (≥ 20) не участвовал, т.к. для него не проводились эксперименты с количеством точек больше 20 ввиду больших временных затрат на выполнение программы.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Для задач малого размера (до 10 точек), требующих нахождения быстрого и оптимального решения, целесообразно применять МВГ. Он требует средних затрат памяти, прост в реализации и разработке.
2. Для задач большого размера (более 10 точек) наилучшим решением, в зависимости от ограниченного ресурса (длины маршрута, времени или объема памяти), оптимальным будет МА – при ограниченности времени и длины маршрута, или ГА – при ограниченности памяти.

Таблица 7 – Результаты экспериментов

N	МВГ		ГА			МА		
	L (м)	T (с)	L (м)	T (с) 242	L _{откл.} (м)	L (м)	T (с)	L _{откл.} (м)
3	570	0,0260	570	0,2527	0	727	0,0477	78,5
4	720	0,0259	720	0,3232	0	904	0,0821	92
5	830	0,0224	840	0,5941	5	1091	0,1334	130,5
6	940	0,0289	960	0,8619	10	1181	0,1641	120,5
7	1060	0,0451	1060	0,9078	0	1377	0,2526	158,5
8	1170	0,0448	1170	1,2125	0	1579	0,3071	204,5
9	1370	0,0877	1390	1,2436	10	1686	0,3874	158
10	1440	0,1420	1470	1,4011	15	1752	0,4854	156
11	1520	1,3597	1850	1,7559	165	1850	0,7006	165
12	1660	4,8953	1700	1,9714	20	1770	0,9023	55
13	1700	8,4896	2240	2,2879	270	2380	1,7126	340
14	1840	11,4426	2010	2,6877	85	2040	1,5928	100
15	1910	16,0965	2260	2,8211	175	2350	1,3306	220
16	1940	24,0616	2180	3,1950	120	2240	2,1808	150
17	2180	44,6673	3740	3,4182	780	2580	1,9585	200
18	2270	56,8748	4170	3,4671	950	2710	2,5936	220
19	2340	72,7696	4410	3,4745	1035	2610	2,0420	135
20	2360	224,9690	4760	3,7696	1200	2780	2,7290	210
21	-	∞	3590	4,1308	-	3190	2,8452	-
22	-	∞	4970	4,3942	-	2950	3,3923	-
23	-	∞	5660	4,5126	-	3490	3,0358	-
24	-	∞	5440	4,7292	-	3850	3,8002	-
25	-	∞	5810	5,0940	-	3590	4,9783	-
26	-	∞	6700	5,5441	-	3500	5,5013	-
Среднее значение T (с) и L (м) для малой выборки точек (≤10)								
	1012,5	0,05289	1022,5	0,84962		1287,125	0,23252	
Среднее значение T (с) или L (м) для большой выборки точек (10 < N ≤ 26)								
	1545,555	46,562643	2902,916	2,66879		2257,375	1,79821	

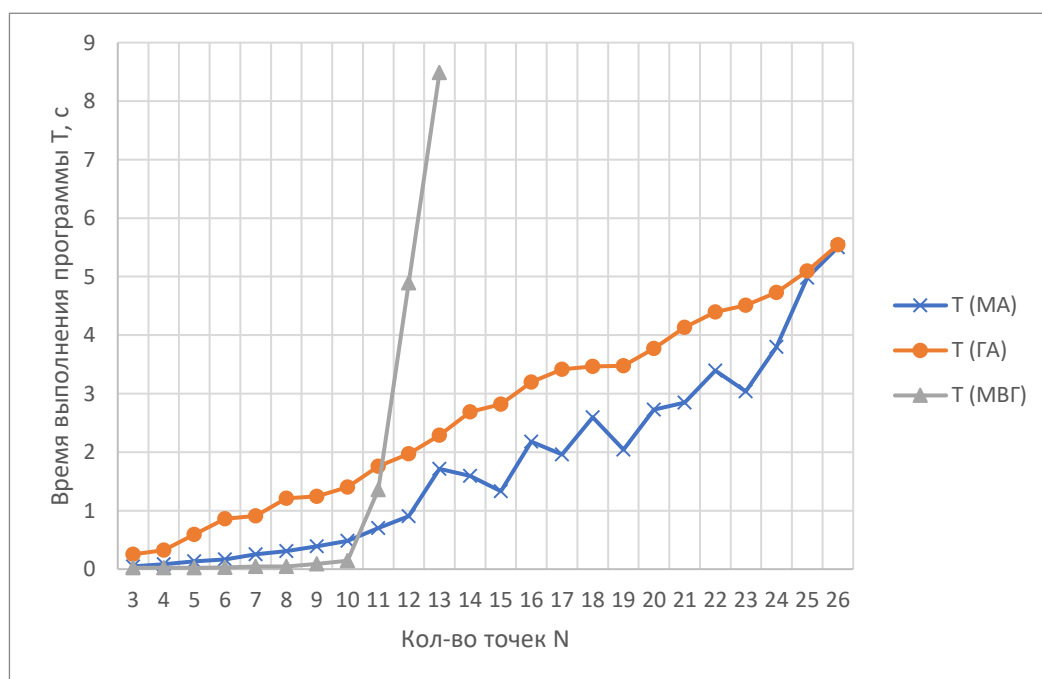


Рисунок 48 - Временная сложность алгоритмов в зависимости от количества точек N

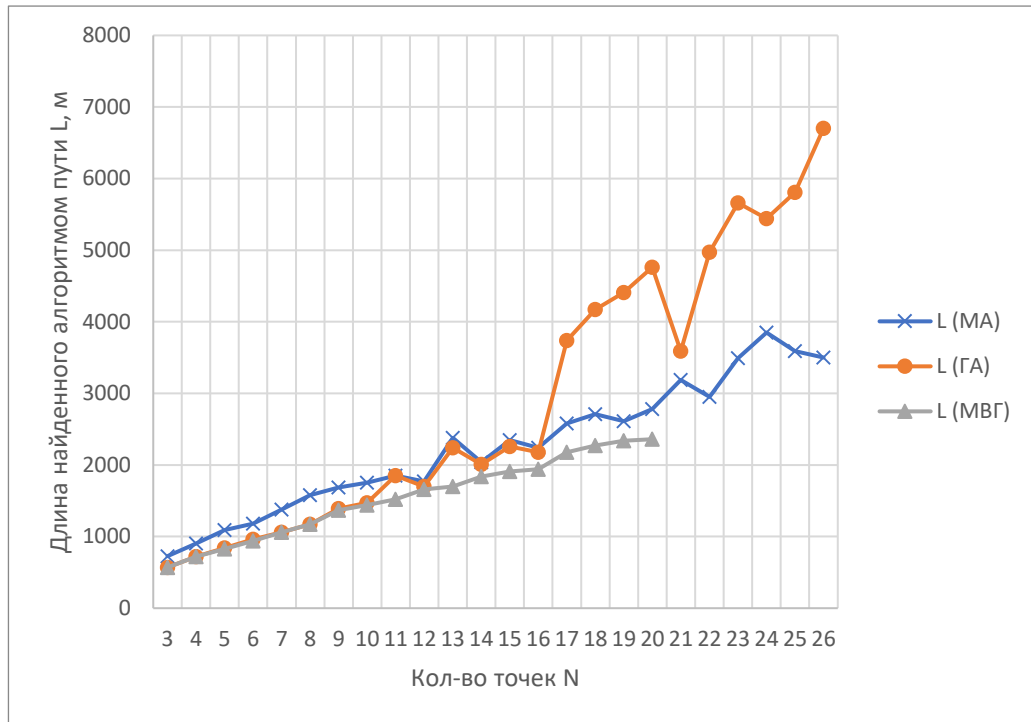


Рисунок 49 - Зависимость длины найденного маршрута от количества точек N

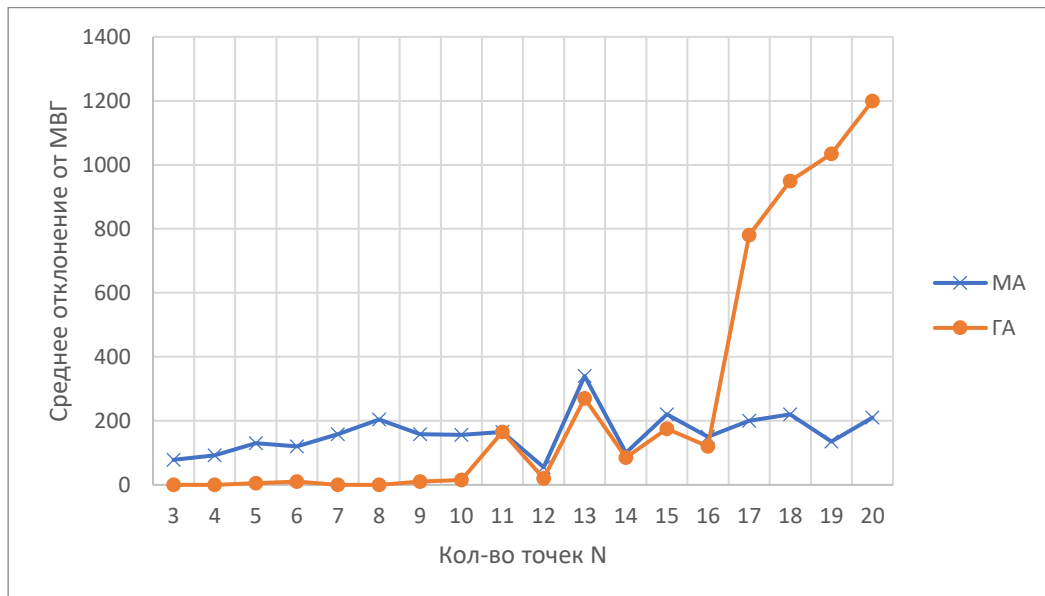


Рисунок 50 - Зависимость среднего отклонения длины пути, найденного эвристическими алгоритмами, от количества точек N

Таблица 8 - Результаты экспериментов

МВГ		ГА		МА	
Пиковый объем	Текущий объем	Пиковый объем	Текущий объем	Пиковый объем	Текущий объем
Малая выборка точек (10)					
334,302 КВ	149,660 КВ	334,749 КВ	153,752 КВ	333,747 КВ	191,578 КВ
Большая выборка точек (26)					
335,580 КВ	164,994 КВ	337,408 КВ	167,430 КВ	422,009 КВ	231,164 КВ

Рассматриваемая задача нахождения близкого к оптимальному пути сочетает в себе ограничения сразу трех ресурсов: и времени, и длины маршрута, и объем памяти, отведенной для вычислений. Количество точек, постоянно меняется от 1 до 26. В данном случае рациональным решением будет использование ГА, имеющего средние (относительно других рассматриваемых алгоритмов) значения для решения задач любой сложности.

Поскольку метод ближайшего соседа и алгоритмы имитации отжига выдают решения, близкие к оптимальному, также фиксировались средние отклонения длин маршрутов $L_{откл}$, полученных данными методами, от длины, которую продемонстрировал точный метод.

Результаты экспериментов отражены в таблице 9. Важно отметить, эксперименты для метода динамического программирования проводились до 20-й точки включительно. Это обусловлено тем фактом, что время, необходимое на выполнение программы, росло экспоненциально с ростом количества точек N . Для более удобного восприятия результаты экспериментов будут рассмотрены отдельно относительно каждого из критериев (таблица 10).

Временная сложность работы методов представлена на рисунке 51. Очевидным является тот факт, что на всем интервале 3-26 наилучшим методом в разрезе времени работы алгоритма является метод ближайшего соседа. Нельзя не упомянуть о том, что для наборов из 3 и 5 точек точный метод оказался быстрее, однако, в данном контексте речь идет об абсолютных отклонениях в

несколько тысячных секунды. Принимая это во внимание, результаты метода динамического программирования и метода ближайшего соседа считаются равными на интервале 3-6. Также замечен экспоненциальный рост времени, необходимый точному методу для решения задачи, с ростом количества точек.

Таблица 9 - Результаты экспериментов

	МДП		АИО			МБС		
N	$L, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$L, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$L_{\text{откл}}, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$L_{\text{откл}}, \text{ м}$
3	560	0,00098	560	0,02417	0	560	0,00102	0
4	720	0,00199	720	0,16219	0	720	0,00099	0
5	820	0,00099	820	0,26365	0	820	0,00199	0
6	940	0,00196	1000	0,32424	60	1000	0,00197	60
7	1060	0,00398	1100	0,49899	40	1100	0,00196	40
8	1170	0,00398	1220	0,60679	50	1230	0,00198	60
9	1370	0,00598	1460	0,76538	90	1370	0,00202	0
10	1440	0,01296	1480	0,95898	40	1450	0,00296	10
11	1520	0,03189	1800	1,05101	280	1590	0,00297	70
12	1660	0,11369	1760	1,35356	100	1730	0,00296	70
13	1700	0,22244	2260	2,56898	560	1810	0,00399	110
14	1820	0,49318	2020	2,38932	200	1820	0,00298	0
15	1880	1,24437	2300	1,99604	420	1900	0,00897	20
16	1940	3,74994	2200	3,27134	260	1940	0,00399	0
17	2180	8,05827	2650	2,93780	470	2380	0,00897	200
18	2270	17,37113	2980	3,89054	710	2500	0,00698	230
19	2330	37,36811	2810	2,65469	480	2560	0,00598	230
20	2360	101,49138	3010	3,54770	650	2700	0,00898	340

	МДП		АИО			МБС		
N	$L, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$L, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$L_{\text{откл}}, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$L_{\text{откл}}, \text{ м}$
21	—	∞	3320	3,69888	—	2750	0,00798	—
22	—	∞	5460	4,41004	—	2990	0,00897	—
23	—	∞	5210	3,64307	—	3090	0,00500	—
24	—	∞	5190	4,18024	—	3150	0,00598	—
25	—	∞	5780	5,32685	—	3510	0,00694	—
26	—	∞	6450	5,88647	—	3680	0,00595	—
Среднее значение T (с) и L (м) для малой выборки точек (≤ 10)								
	1010	0,00410	1045	0,45054		1031,25	0,00186	
Среднее значение T (с) и L (м) для большой выборки точек ($10 < N \leq 26$)								
	1966	17,01444	3450	3,30040		2506,25	0,00610	

Графическая интерпретация длин маршрутов, полученных каждым из рассматриваемых методов, представлена на рисунке 52. В промежутке 3-10 отклонения длин маршрутов, полученных эвристическими методами, отличаются незначительно. Однако, после 10 точки наблюдается рост величины отклонения с ростом точек у алгоритма имитации отжига. У метода ближайшего соседа рост отклонений наблюдается только после 16 точки.

Таблица 10 - Средние значения пикового и текущего объема памяти

МДП		АИО		МБС	
Пиковый объем	Средний объем	Пиковый объем	Средний объем	Пиковый объем	Средний объем
Малая выборка точек (10)					
70,371 KB	67,139 KB	334,747 KB	184,301 KB	66,355 KB	66,321 KB
Большая выборка точек (26)					

4785,512 KB	989,4625 KB	401,132 KB	199,42 KB	66,355 KB	66,325 KB
----------------	----------------	------------	-----------	-----------	-----------

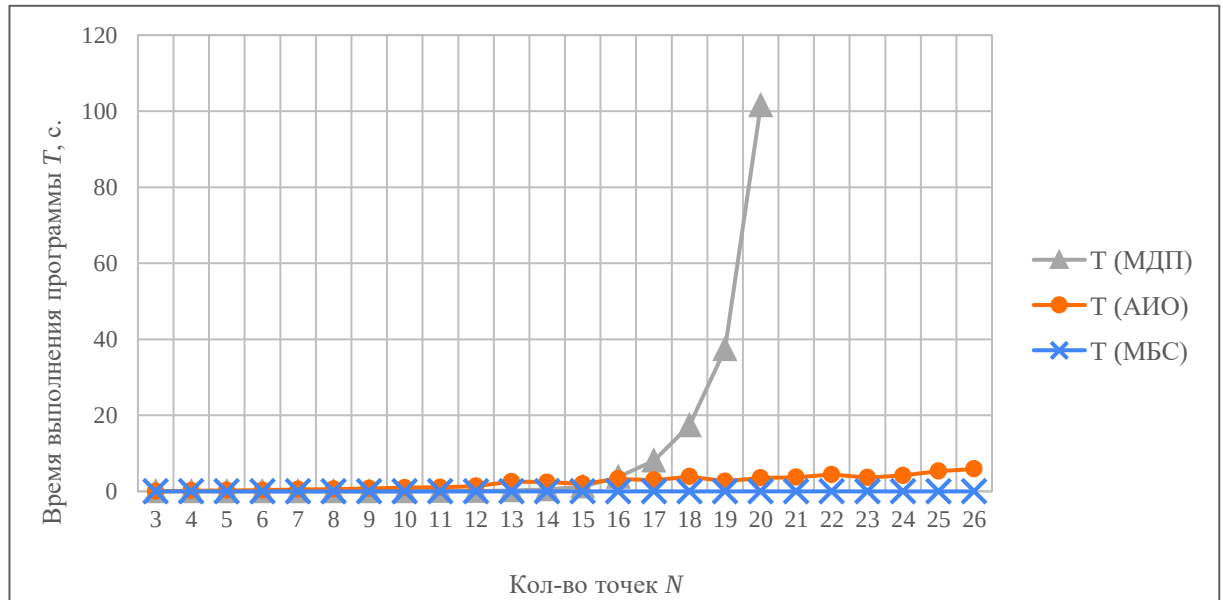


Рисунок 51 - Временная сложность алгоритмов в зависимости от количества точек N

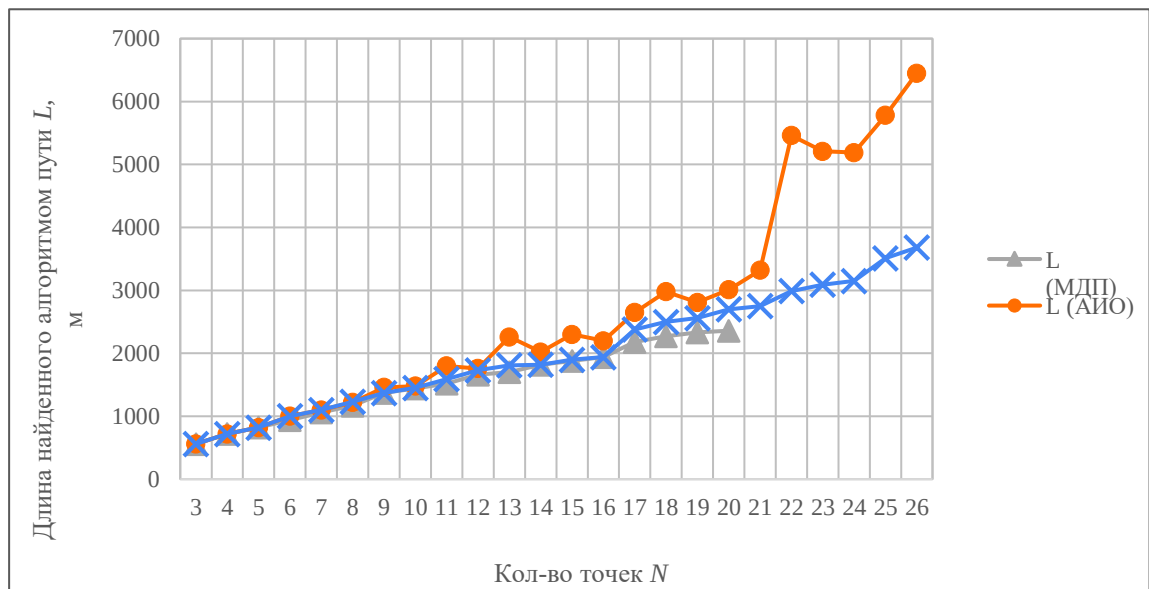


Рисунок 52 - Зависимость длины маршрута от количества точек N

Абсолютные отклонения результатов АИО и МБС относительно длины маршрута, полученного методом динамического программирования, можно проследить на рисунке 53.

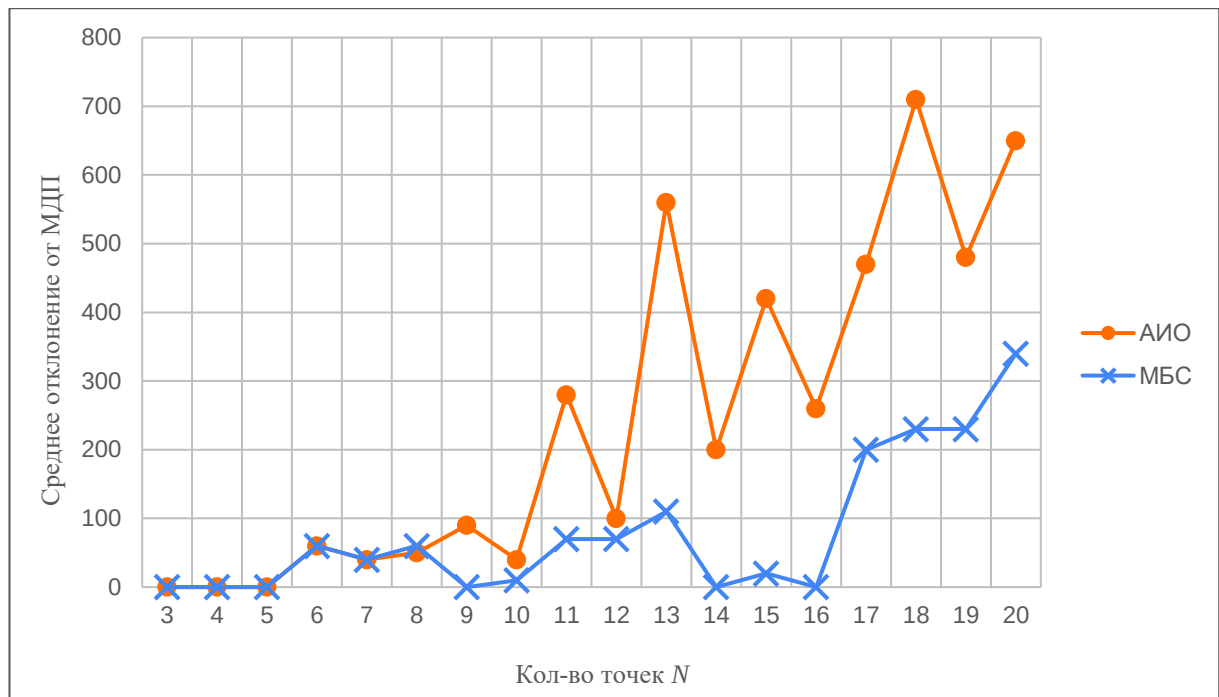


Рисунок 53 - Зависимость среднего отклонения длины пути, найденного эвристическими алгоритмами, от количества точек N

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Для задач с малым набором точек ($N \leq 10$), в силу своей скорости и невысокого отклонения результатов от эталонных значений метод ближайшего соседа можно рассматривать как наилучший из рассматриваемых методов на данном интервале.

2. Для задач с большим набором точек ($10 < N \leq 26$) наиболее целесообразно использовать метод ближайшего соседа. Выбор обусловлен тем, что отклонения от результатов точного метода в разрезе длины маршрута не столь значительны, однако, скорость работы и средние затраты памяти значительно лучше, чем у АИО и МДП.

Из проведенных расчетов и сравнительного анализа полученных результатов следует, что выбор алгоритма для построения оптимального маршрута зависит от количества заданных точек. Можно сделать следующие выводы:

1. Для малого количества заданных точек (в интервале 1-10) наиболее целесообразным способом поиска оптимального маршрута является точный алгоритм, реализуемый в данной работе через МВГ. Временные показатели ра-

боты программы, длины полученных маршрутов и объем используемой в процессе работы программы памяти являются наилучшими из представленных алгоритмов. Стоит отметить, что длины маршрутов, полученные с помощью ГА, незначительно отклоняются от результатов МВГ (среднее отклонение $\Delta L_{\text{ср}} = 3,5$ м, или 0,86%), но временные показатели работы программы многократно больше (в среднем время работы ГА в 18,7 раз больше, чем время работы МВГ). МА также значительно уступает как в скорости работы (в среднем время работы МА в 4,6 раз больше, чем время работы МВГ), так и в длине построенных маршрутов (среднее отклонение $\Delta L_{\text{ср}} = 137,3$ м, или 27,47%).

2. Для большого количества точек (в интервале 11-26), на основе проведенного эксперимента, наиболее целесообразным методом является МА. Для МВГ в данном интервале увеличение количества заданных точек сопряжено с увеличением времени работы программы, которое имеет экспоненциальный характер. Значительно отклоняются показатели длины полученного маршрута ГА по сравнению с МА (среднее отклонение $\Delta L_{\text{ср}} = 1100,625$ м, или 34,94%), также время работы ГА дольше (в среднем время работы ГА в 1,56 раза больше, чем время работы МА).

3. Для малых наборов точек ($N \leq 10$) среди рассматриваемых методов с точки зрения длин полученных маршрутов наилучший из результатов продемонстрирован методом динамического программирования. Тем не менее, результаты, продемонстрированные эвристическими методами, очень близки к эталону. Максимальные отклонения, наблюдаемые у алгоритма имитации отжига и метода ближайшего соседа, составили 90 и 60 метров соответственно, что в относительном выражении составит 6,57% и 6,38%. Среднее же отклонение для алгоритма имитации отжига на данном интервале составит 35 м, или 3,47%, для метода ближайшего соседа — 21,25 м, или 2,10%. С точки зрения времени, необходимого на вычисления, АИО продемонстрировал наихудший результат. Если разницу во времени работы МДП и МБС можно не принимать во внимание в силу незначительности отклонения, то отклонения АИО составят в среднем 12598,96% и 21744,33% относительно МДП и МБС. Можно

заметить, что объемы памяти для работы АИО также значительно выше: в среднем затраты выше на 174,51%, чем у точного метода, и на 177,89% выше, чем у метода ближайшего соседа. Так, можно утверждать, что для малой выборки точек целесообразно использование как метода динамического программирования, так и метода ближайшего соседа.

4. Для большой выборки точек ($10 < N \leq 26$) среди эвристических по длине полученного маршрута наилучшим является МБС. Маршрут, полученный данным методом, в среднем на 943,75 м, или 32,11%, короче. Максимальное относительное отклонение составило внушительные 82,61% (для набора из 22 точек). Конечно, метод динамического программирования как точный метод все еще остается наилучшим по данному показателю, однако его точность сохраняется до набора с 20 точками, поскольку после этой отметки временные затраты на работу становятся неприемлемыми. Метод динамического программирования на всем интервале 11-20 затрачивает времени больше, чем МБС, и, начиная с 16 точек, — больше, чем АИО. Среднее отклонение АИО относительно МБС на данном интервале, равно 3,29 с, что составляет 57168,94%. С точки зрения объемов памяти наилучшим методов также остается МБС: МДП тратит в среднем на 1391,84%, а АИО — на 200,67%.

Таким образом, выбор алгоритма для поиска оптимального маршрута необходимо осуществлять, исходя из количества заданных точек. Для малого количества точек ($N \leq 10$) МВГ динамическое программирование является наиболее предпочтительным. С увеличением числа точек более эффективные результаты дает эвристический подход, представленный в данной работе МА, ГА, МБС и АИО.

Поскольку одновременно требуется высокая точность, высокая скорость и низкое потребление памяти, единственного критерия «лучшего алгоритма» нет. Сравнение следует рассматривать как многокритериальную задачу:

$$\max K_{\text{acc}}^{(a)}, \min K_{\text{time}}^{(a)}, \min K_{\text{mem}}^{(a)}.$$

Алгоритм a считается предпочтительным, если он не уступает другим алгоритмам одновременно по всем трем показателям. Такой алгоритм называют недоминируемым или принадлежащим множеству Парето.

Если требуется получить единую интегральную оценку, показатели можно объединить:

$$K_{\text{alg}}^{(a)} = w_1 K_{\text{acc}}^{(a)} + w_2 K_{\text{time}}^{(a)} + w_3 K_{\text{mem}}^{(a)}, \#(25)$$

где

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1, w_i \geq 0.$$

При этом веса зависят от назначения информационной системы: для автономного управления приоритет может отдаваться скорости; для стратегического планирования – точности; для встроенных или ограниченных вычислительных устройств – объему памяти.

Поскольку точные и эвристические алгоритмы имеют различные профили качества, выбор метода осуществляется с учетом трех ограничений: точности решения, времени выполнения и объема доступной памяти. Поэтому для концептуального уровня системы управления машиностроительным производством предлагается гибридный механизм, в котором эвристический алгоритм сначала формирует допустимое решение, а точный алгоритм при наличии вычислительных ресурсов уточняет его.

Логика алгоритма гибридного подхода

При небольшом количестве точек N запускается один из точных алгоритмов: МДП – если ограничение по памяти выполняется; МВГ – если требуется использовать верхнюю границу и отсечение ветвей.

Выбор между МДП и МВГ осуществляется по прогнозируемым затратам:

$$A_{\text{exact}} = \arg \min_{A \in \{\text{МДП}, \text{МВГ}\}} T_A(N),$$

при выполнении условий:

$$T_A(N) \leq T_{\text{max}}, M_A(N) \leq M_{\text{max}}.$$

Если оба алгоритма удовлетворяют ограничениям, преимущество отдается методу с меньшим прогнозируемым временем работы. Если прогнозы близки, выбирается МВГ, поскольку он позволяет использовать эвристическое начальное решение как верхнюю границу.

При увеличении N , когда применение точного алгоритма становится неприемлемым, выбирается эвристический алгоритм:

- МБС – для максимально быстрого получения допустимого решения;
- МА – для поиска качественного решения при умеренных ограничениях по времени;
- ГА – при необходимости исследовать несколько областей пространства решений;
- АИО – если требуется дополнительно выходить из локальных минимумов.

Для выбора эвристического метода можно использовать нормированный критерий:

$$K_A = w_L K_L^{(A)} + w_T K_T^{(A)} + w_M K_M^{(A)},$$

где $K_L^{(A)}$ – оценка точности маршрута; $K_T^{(A)}$ – оценка скорости; $K_M^{(A)}$ – оценка эффективности использования памяти; w_L, w_T, w_M – веса критериев:

$$w_L + w_T + w_M = 1.$$

При этом для получения начального маршрута целесообразно использовать МБС, поскольку он имеет небольшую вычислительную сложность. Затем полученный маршрут можно улучшить с помощью МА, ГА или АИО.

Однако последний переход выполняется только при наличии достаточного времени и памяти. МБС в этой схеме используется как быстрый генератор начального допустимого маршрута, один из трех эвристических методов – для улучшения маршрута, а МВГ или МДП – для уточнения результата на допустимом размере задачи.

Алгоритм гибридного подхода

Алгоритм Hybrid_TSP

Вход:

D – матрица расстояний;
 N – количество точек;
 T_max – допустимое время;
 M_max – допустимая память;
 N_exact – порог применения точного метода;
 ϵ – допустимое отклонение.

Выход:

L_best – длина лучшего найденного маршрута;
 route – лучший маршрут;
 status – статус решения.

1. Если $N \leq N_exact$ и ресурсов достаточно, то:
 - выбрать МДП или МВГ;
 - запустить выбранный точный алгоритм;
 - если алгоритм завершен полностью:
 - вернуть точное решение;
 - иначе:
 - вернуть лучшее найденное решение.
 2. Иначе:
 - запустить МБС;
 - сохранить полученный маршрут как route_best;
 - установить L_best равным его длине.
 3. Выбрать эвристический алгоритм:
 - МА – если приоритетом является качество маршрута;
 - ГА – если требуется исследование разных областей поиска;
 - АИО – если требуется выход из локального минимума.
 4. Запустить выбранный эвристический алгоритм
 - с маршрутом route_best в качестве начального решения.
 5. Если найден маршрут короче текущего:
 - route_best $\leftarrow$ новый маршрут;
 - L_best $\leftarrow$ его длина.
 6. Если время или память исчерпаны:
 - вернуть route_best;
 - status $\leftarrow$ «эвристическое решение».
 7. Если ресурсы позволяют продолжить точный поиск:
 - передать route_best в МВГ;
 - установить верхнюю границу UB $\leftarrow$ L_best.
 8. Пока существуют активные ветви и ресурсы не исчерпаны:
 - вычислять нижние границы ветвей;
 - отбрасывать ветви, для которых LB $\geq$ L_best;
 - обновлять L_best при нахождении более короткого маршрута.
 9. Если все ветви обработаны:
 - status $\leftarrow$ «точное решение»;
 - иначе:
 - status $\leftarrow$ «приближенное решение».
 10. Вернуть route_best, L_best и status.
- Конец алгоритма.

В приведенном алгоритме МБС используется для быстрого формирования начального допустимого маршрута, МА, ГА или АИО – для его эвристического улучшения, а МДП или МВГ – для точного решения задач допустимого размера либо уточнения найденного маршрута. Переключение между алгоритмами осуществляется на основании количества точек, доступного времени и объема памяти. При полном завершении точного поиска решение считается оптимальным; при остановке по ресурсным ограничениям возвращается лучшее найденное приближенное решение.

Таким образом, алгоритмы рассматриваются как элементы концептуального уровня информационной системы управления машиностроительным производством. Их качество определяется совокупностью показателей. Задача коммивояжера используется в качестве тестовой задачи, позволяющей количественно сравнить точные и эвристические алгоритмы. Выбор алгоритма или их комбинации осуществляется с учетом требуемого компромисса между точностью, скоростью и памятью.

4.3. Оценка внутреннего уровня архитектуры системы управления производством

Внутренний уровень архитектуры системы управления машиностроительным производством характеризуется совокупностью показателей, таких как производительность, объем занимаемой памяти, вероятность безотказной работы, гибкость управления, доступность и точность информации. На этом уровне ключевую роль играют структуры баз данных и эффективность SQL-запросов, которые обеспечивают хранение и обработку информации о заказах, ресурсах, продуктах, технологических процессах и состоянии инфраструктуры [80, 296].

В рассматриваемой модели архитектуры СУ внутренний уровень представлен как уровень данных: таблиц, индексов, хранилищ, витрин и механизмов выборки. При оптимизации внутреннего уровня возникает противоречие между двумя фундаментальными критериями:

- J_1 – минимизация объема занимаемой памяти;

- J_2 – минимизация стоимости и времени выполнения типовой нагрузки SQL-запросов.

С точки зрения хранения данных минимизация J_1 требует максимальной нормализации схемы базы данных, устранения избыточности и дублирования информации. С точки зрения производительности минимизация J_2 нередко приводит к рекомендациям по денормализации: введению агрегированных таблиц, дублирующих атрибутов и сокращению количества операций соединения. Таким образом, на внутреннем уровне архитектуры формируется классическая многокритериальная задача оптимизации, где повышение одного показателя (компактности хранения) может сопровождаться ухудшением другого (быстродействия).

Для формального описания внутреннего уровня используем аппарат теории множеств. Пусть:

- $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ – множество отношений (таблиц) в базе данных;
- для каждого отношения R_j задано множество атрибутов $A(R_j) = \{a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn_j}\}$;
- множество всех атрибутов базы данных: $A = \bigcup_{j=1}^m A(R_j)$;
- $\mathcal{F}$ – множество функциональных зависимостей вида $X \rightarrow Y$, где $X, Y \subseteq A$.

Каждая схема базы данных может быть представлена как пара $(A, \mathcal{F})$ и семейство подмножеств $\{A(R_j)\} \subseteq 2^A$, удовлетворяющих заданным функциональным зависимостям и ограничениям целостности. Нормальные формы интерпретируются как дополнительные ограничения на структуру этих подмножеств:

- 1НФ – атомарность значений атрибутов;
- 2НФ – отсутствие частичных зависимостей неключевых атрибутов от части составного ключа;
- 3НФ – отсутствие транзитивных зависимостей неключевых атрибутов от ключа.

Формально, если $K_j \subseteq A(R_j)$ – множество атрибутов ключа отношения R_j , то нарушение 3НФ возникает при наличии цепочки зависимостей

$$K_j \rightarrow X, X \rightarrow Y, X, Y \subseteq A(R_j) \setminus K_j,$$

порождающей транзитивную зависимость $K_j \rightarrow Y$. Для приведения отношения к 3НФ выполняется декомпозиция множества $A(R_j)$ на несколько подмножеств, в которых транзитивные зависимости устранены.

Рассмотрим типичное отношение системы управления машиностроительным производством, моделирующее заказы:

$$R_{\text{Order}}(\text{OrderID}, \text{CustomerName}, \text{CustomerAddress}, \\ \text{ProductID}, \text{ProductName}, \text{UnitPrice}, \text{Quantity}).$$

В этом отношении ключом является атрибут OrderID. При этом наблюдаются транзитивные зависимости:

- $\text{OrderID} \rightarrow \text{CustomerName}, \text{CustomerAddress};$
- $\text{OrderID} \rightarrow \text{ProductID}$, а далее $\text{ProductID} \rightarrow \text{ProductName}, \text{UnitPrice}.$

То есть атрибуты ProductName и UnitPrice транзитивно зависят от OrderID через ProductID, а атрибуты CustomerName и CustomerAddress могут повторяться для множества заказов одного клиента.

С точки зрения теории множеств исходное отношение описывается как подмножество:

$$A(R_{\text{Order}}) = \{\text{OrderID}, \text{CustomerName}, \text{CustomerAddress}, \text{ProductID}, \\ \text{ProductName}, \text{UnitPrice}, \text{Quantity}\} \subseteq A.$$

Приведение схемы к 3НФ требует декомпозиции на три отношения:

$$R'_{\text{Order}}(\text{OrderID}, \text{CustomerID}, \text{ProductID}, \text{Quantity}), \\ R_{\text{Customer}}(\text{CustomerID}, \text{CustomerName}, \text{CustomerAddress}), \\ R_{\text{Product}}(\text{ProductID}, \text{ProductName}, \text{UnitPrice}),$$

где введены суррогатные ключи CustomerID и ProductID, а повторяющиеся данные вынесены в отдельные отношения. Тогда:

$$A(R'_{\text{Order}}) \cup A(R_{\text{Customer}}) \cup A(R_{\text{Product}}) = A(R_{\text{Order}}) \cup \{\text{CustomerID}\},$$

то есть пространство атрибутов расширилось за счет введения нового идентификатора, но повторяющиеся значения

CustomerName, CustomerAddress, ProductName, UnitPrice перестали дублироваться для каждого заказа.

Оценим изменение объема данных. Пусть:

- N_{ord} – количество заказов;
- N_{cust} – количество уникальных клиентов;
- N_{prod} – количество уникальных продуктов;
- $s(\cdot)$ – средний размер хранения атрибута.

Тогда объем данных до нормализации:

$$V_{\text{data}}^{\text{denorm}} = N_{\text{task}} \cdot (s(\text{TaskID}) + s(\text{OrderID}) + s(\text{WorkshopName}) + s(\text{WorkshopAddress}) + s(\text{EquipmentID}) + s(\text{EquipmentName}) + s(\text{EquipmentType}) + s(\text{StartTime}) + s(\text{EndTime}) + s(\text{Status})).$$

После нормализации:

$$V_{\text{data}}^{\text{norm}} = N_{\text{task}}(s_T + s_O + s_W + s_E + s_S + s_{ST} + s_{EN})$$

где введены обозначения:

- $s_T = s(\text{TaskID})$, $s_O = s(\text{OrderID})$, $s_W = s(\text{WorkshopID})$, $s_E = s(\text{EquipmentID})$,
- $s_{ST} = s(\text{StartTime})$, $s_{EN} = s(\text{EndTime})$, $s_S = s(\text{Status})$,
- $s_{WN} = s(\text{WorkshopName})$, $s_{WA} = s(\text{WorkshopAddress})$,
- $s_{EN} = s(\text{EquipmentName})$, $s_{ET} = s(\text{EquipmentType})$.

При типичных условиях машиностроительного производства $N_{\text{ord}} \gg N_{\text{cust}}, N_{\text{prod}}$. Это означает, что суммарный объем хранения повторяющихся данных в исходном отношении существенно превышает объем в нормализованной схеме. Формально можно записать:

$$V_{\text{data}}^{\text{norm}} < V_{\text{data}}^{\text{denorm}},$$

что подтверждает эффективность нормализации по критерию J_1 – минимизации объема занимаемой памяти.

Однако выполнение типового запроса, формирующего информацию о заказе с данными клиента и продукта, в нормализованной схеме требует соединения трех отношений:

$$q_{\text{order}}: R'_{\text{Order}} \bowtie R_{\text{Customer}} \bowtie R_{\text{Product}},$$

в то время как в денормализованной схеме достаточно одного отношения R_{Order} . Это приводит к увеличению числа узлов плана выполнения запроса, объема промежуточных данных, времени соединения и, как следствие, к росту стоимости $C(q_{\text{order}})$ и времени выполнения $T(q_{\text{order}})$. В общем виде можно записать:

$$C^{\text{norm}}(q_{\text{order}}) > C^{\text{denorm}}(q_{\text{order}}),$$

$$T^{\text{norm}}(q_{\text{order}}) > T^{\text{denorm}}(q_{\text{order}}),$$

что отражает противоречие между нормализацией и производительностью.

Пусть задана схема базы данных $(A, \mathcal{F}, R)$ для системы управления машиностроительным производством и множество типовых запросов $\mathcal{Q} = \{q_1, \dots, q_K\}$, характеризующих эксплуатационную нагрузку (операции управления заказами, планирования, контроля защищенности, аналитической отчетности и т.п.).

При анализе производительности информационной системы, можно сформулировать целевую функцию стоимости SQL-запросов:

$$C(q_k) = w_1 x_1^{(k)} + w_2 x_2^{(k)} + w_3 x_3^{(k)} + w_4 x_4^{(k)} + w_5 x_5^{(k)},$$

где:

- $x_1^{(k)}$ – нормированная фактическая длина запроса (объем возвращаемых данных);
- $x_2^{(k)}$ – количество отфильтрованных строк;
- $x_3^{(k)}$ – объем данных, прочитанных из RAM;
- $x_4^{(k)}$ – объем данных, прочитанных с диска;
- $x_5^{(k)}$ – время выполнения запроса;
- w_i – веса, соответствующие значимости соответствующих факторов.

Решить задачу оптимизации стоимости запросов можно методом внутренней точки, что позволяет найти оптимальные значения параметров

$(x_1, \dots, x_5)$, минимизирующие агрегированную стоимость $\Phi(x)$ при заданных ограничениях [263, 257, 245, 180].

В контексте внутреннего уровня архитектуры эта модель можно рассматривать как оператор $\mathcal{C}$, связывающий структуру схемы R и параметры нагрузки с вектором нормированных характеристик запросов:

$$\mathcal{C}: (R, \mathcal{Q}) \mapsto \{x_1^{(k)}, \dots, x_5^{(k)}\}_{k=1}^K,$$

после чего агрегированная стоимость нагрузки определяется как:

$$J_2(R, \mathcal{Q}) = \sum_{k=1}^K \alpha_k C(q_k),$$

где α_k – веса, отражающие относительную частоту или важность запросов q_k .

С другой стороны, объем данных $J_1(R)$ определяется по формуле:

$$J_1(R) = V_{\text{data}}(R) = \sum_{j=1}^m \sum_{a \in A(R_j)} N(R_j) \cdot s(a).$$

Тогда многокритериальная задача оптимизации внутреннего уровня архитектуры системы управления производством принимает вид:

$$\begin{cases} J_1(R) \rightarrow \min, \\ J_2(R, \mathcal{Q}) \rightarrow \min, \\ R \in \mathcal{R}(A, \mathcal{F}), \end{cases}$$

где $\mathcal{R}(A, \mathcal{F})$ – множество схем, согласованных с атрибутами и функциональными зависимостями, а также удовлетворяющих требованиям целостности и минимального уровня нормализации (например, не ниже 3НФ для ключевых таблиц).

Для практической реализации этой постановки можно использовать два подхода:

1. Агрегированная целевая функция:

$$J(R) = \lambda_1 J_1(R) + \lambda_2 J_2(R, \mathcal{Q}) \rightarrow \min,$$

где λ_1, λ_2 – параметры, задающие баланс между экономией памяти и быстродействием запросов. Величины λ_1, λ_2 выбираются исходя из ограничений на ресурсную базу предприятия и требований к времени отклика системы (например, в реальном времени при контроле защищенности).

2. Парето-оптимизация: формируется множество недоминируемых схем, для которых невозможно уменьшить J_1 без увеличения J_2 и наоборот. Для каждой схемы проводится численный эксперимент по модели стоимости запросов, а окончательный выбор конфигурации осуществляется с учетом требований к надежности, производительности и объемам данных.

Таким образом, постановка многокритериальной задачи на внутреннем уровне архитектуры интегрирует:

- теоретические аспекты нормализации/денормализации баз данных (через $(A, \mathcal{F}, R)$);
- модель стоимости SQL-запросов и метод внутренней точки (через $\mathcal{C}$ и $\Phi(x)$);

В результате решения задачи оптимизации на внутреннем уровне можно количественно оценить влияние изменений схемы данных на показатели качества, производительности и надежности системы управления машиностроительным производством.

4.4. Оценка критериев архитектуры системы управления производством методами нечеткой логики

Этап 1. Концепция моделирования. Объектом моделирования является система управления машиностроительным производством (Приложение В). Методом исследований является информационное моделирование в вычислительной системе MATLAB с использованием Fuzzy Logic Toolbox и Simulink [57, 79].

Обработка критериев осуществляется в соответствии с каскадной схемой, состоящей из трех уровней композиции:

Первый уровень – пять блоков нечеткого логического вывода (НЛВ), оценивающих первичные критерии;

Второй уровень – два блока НЛВ, агрегирующих результаты первого уровня;

Третий уровень – один блок НЛВ, формирующий комплексную оценку СУ.

Структура каскадной схемы:

Первый уровень композиции (5 блоков):

Блок 1.1: Предрасположенность к отказам (четкий) + Гибкость управления (нечеткий) → Организационная система;

Блок 1.2: Уровень стресса пользователей (нечеткий) + Удовлетворенность пользователей (нечеткий) + Предрасположенность к ошибкам (четкий) → Индивидуальные качества системы;

Блок 1.3: Доступность информации (нечеткий) + Точность предоставления информации (нечеткий) → Обращение информации;

Блок 1.4: Производительность системы (четкий) → Технологичность;

Блок 1.5: Фильтры (нечеткий) + Эффективность (нечеткий) + Целесообразность (нечеткий) → Системность.

Второй уровень композиции (2 блока):

Блок 2.1: Организационная система + Индивидуальные качества системы + Обращение информации → Сервисзначимые параметры;

Блок 2.2: Технологичность + Системность → Технические параметры.

Третий уровень композиции (1 блок):

Блок 3.1: Сервисзначимые параметры + Технические параметры → Комплексная оценка СУ.

Этап 2. Входные данные. В качестве входных данных используются результаты опроса шестидесяти пользователей СУ по одиннадцати критериям. Результаты опроса представлены в виде матрицы данных (60 строк × 11 столбцов) в файле Microsoft Excel (ToR.xlsx).

Этап 3 – 5. Принципы формирования нечетких систем. Для каждого блока каскадной схемы формируются:

- входные и выходные терм-множества (лингвистические переменные);

- функции принадлежности (тип gaussmf, zmf);
- базы знаний (алгоритм Mamdani, методы: And – min, Implication – min, Aggregation – max, Defuzzification – mom).

Подробные параметры функций принадлежности и визуализация поверхностей отклика для каждого блока представлены в Приложении В.

Этап 6 – 7. Реализация в Simulink. Модель информационной системы реализована в среде Simulink (Приложение Д). Главный скрипт (MainScript.m) выполняет:

- загрузку данных из файла ToR.xlsx;
- предварительную обработку нечетких ответов респондентов;
- запуск модели Simulink;
- вычисление средней комплексной оценки СУ.

Результаты эксперимента (Приложение Е). Комплексная оценка СУ по результатам нечеткого логического вывода составила 89 баллов из 100, что соответствует оценке «Очень хорошая» с уверенностью 88%.

Ход эксперимента. Эксперимент проводится в соответствии со схемой (Приложение Ж):

- Последовательный запуск вспомогательных скриптов (CurveF1.m – CurveF5.m) для дефаззификации нечетких ответов респондентов.
- Запуск главного скрипта MainScript.m, который построчно обрабатывает данные опроса и запускает модель Simulink.
- Формирование результата оценки СУ в виде массива из 60 баллов (по одному на каждого респондента).

Результаты НЛВ для каждого блока критериев представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты нечетких логических выводов

№	Название критерия	Балльная оценка
1	Организационная система	74,4
2	Индивидуальные качества системы	66,6
3	Обращение информации	66,3

4	Технологичность	79,4
5	Системность	72,9
6	Сервисзначимые параметры	88,4
7	Технические параметры	87,0
8	Комплексная оценка СУ	89,0

Наиболее низкие баллы у критериев «Индивидуальные качества системы» (66,6) и «Обращение информации» (66,3). Разработчикам СУ рекомендуется:

- снизить уровень стресса пользователей при работе с системой;
- улучшить характеристики, влияющие на удовлетворенность пользователей;
- снизить количество ошибок («Предрасположенность к ошибкам»);
- улучшить доступность и точность предоставления информации.

Наиболее точную оценку системам управления производством могут дать их пользователи. Оценка не всегда может быть выражена в четких значениях. Поэтому применение полученной модели позволит разработчикам выявлять «узкие места» в их системах управления производством, в которых ключевые показатели эффективности СУ низкие. Совершенствование систем управления производством с использованием разработанной модели позволит увеличить конкурентоспособность и, в конечном итоге, увеличить эффективность работы предприятия, использующих их.

Масштабируемость разработанной нечеткой модели

Разработанная модель проверена на массиве данных, содержащем результаты опроса 60 пользователей. При этом число пользователей не определяет размер базы нечетких правил. Для каждого пользователя выполняется один и тот же алгоритм нечеткого вывода, а результат записывается в соответствующий элемент выходного массива. Поэтому при увеличении числа пользователей от $N = 60$ до $N = N_{\text{new}}$ изменяется только объем обрабатываемых данных и время пакетного расчета:

$$T_{\text{total}} \approx N \cdot T_{\text{FIS}},$$

где T_{FIS} – время обработки одного набора входных критериев; N – количество пользователей или наблюдений.

Таким образом, увеличение числа пользователей не требует формирования новых правил, изменения функций принадлежности или перестройки архитектуры каскадной модели. При неизменных критериях, термах и базе знаний вычислительная сложность возрастает приблизительно линейно по числу пользователей.

В отличие от количества пользователей, увеличение числа критериев и лингвистических термов непосредственно влияет на размер базы знаний. Если нечеткая система имеет n входных критериев, а q_i – количество термов для i -го критерия, то при полном переборе потенциальное количество комбинаций правил определяется выражением:

$$R_{\text{full}} = \prod_{i=1}^n q_i \cdot \#(20)$$

При одинаковом количестве термов q для всех входов:

$$R_{\text{full}} = q^n.$$

Например, для трех входных критериев, каждый из которых описывается тремя термами, потенциальное количество комбинаций составляет:

$$R_{\text{full}} = 3^3 = 27.$$

Именно поэтому в блоках 1.2, 1.5 и 2.1, содержащих по три входных критерия с тремя термами, база знаний может включать до 27 правил. Для блоков с двумя входами и тремя термами число потенциальных комбинаций составляет:

$$R_{\text{full}} = 3^2 = 9.$$

Для одновходового блока 1.4 достаточно:

$$R_{\text{full}} = 3^1 = 3.$$

При увеличении числа критериев построение единой базы знаний становится нецелесообразным. Например, при 11 критериях и трех термах для каждого из них потенциальное число комбинаций достигает:

$$R_{\text{full}} = 3^{11} = 177147.$$

Формирование и экспертная проверка такой базы знаний затруднены, а ее использование приводит к росту требований к памяти, времени расчета и сопровождению модели.

Для предотвращения комбинаторного роста в работе применяется каскадная архитектура. В ней 11 исходных критериев распределяются между несколькими блоками первого уровня, результаты которых передаются на последующие уровни. Количество правил в каскадной модели определяется не произведением числа термов всех исходных критериев, а суммой количества правил в отдельных блоках:

$$R_{\text{cascade}} = \sum_{\ell=1}^L \sum_{b=1}^{B_{\ell}} R_{\ell b}, \#(22)$$

где L – число уровней композиции; B_{ℓ} – число блоков на уровне ℓ ; $R_{\ell b}$ – количество правил в b -м блоке уровня ℓ .

Для разработанной структуры:

- блоки 1.1 и 1.3 имеют по два входа и потенциально по $3^2 = 9$ правил;
- блок 1.2 имеет три входа и потенциально $3^3 = 27$ правил;
- блок 1.4 имеет один вход и 3 правила;
- блок 1.5 имеет три входа и $3^3 = 27$ правил;
- блоки 2.1 и 2.2 получают по три термина на каждом входе и потенциально имеют по 27 правил;
- блок 3.1 имеет два входа и потенциально 9 правил.

Следовательно, при полном заполнении баз знаний суммарное количество правил каскадной модели оценивается как:

$$R_{\text{cascade}} = 9 + 27 + 9 + 3 + 27 + 27 + 27 + 9 = 138$$

Это существенно меньше одноуровневой модели с 11 входами и тремя терминами, для которой потребовалось бы 177147 комбинаций правил.

При этом приведенная оценка является верхней границей. Фактическое число правил может быть меньше, если эксперт исключает комбинации входных состояний, которые не имеют физического или содержательного смысла.

Такие правила должны исключаться документированно, чтобы уменьшение базы знаний не нарушало полноту описания предметной области.

Оценка вычислительной сложности

При дискретном представлении выходной функции принадлежности на G точках вычислительная нагрузка одного блока приблизительно пропорциональна:

$$C_{\text{block}} = O(R_{\text{block}} \cdot G),$$

где R_{block} – число правил блока; G – количество точек дискретизации выходной шкалы.

Для всей каскадной модели при обработке N пользователей:

$$C_{\text{total}} = O\left(N \cdot G \cdot \sum_{\ell=1}^L \sum_{b=1}^{B_{\ell}} R_{\ell b}\right)$$

При фиксированной архитектуре и базе знаний увеличение числа пользователей приводит к линейному росту вычислительных затрат:

$$C_{\text{total}} \sim O(N).$$

Если же увеличивается число критериев, термов или правил, вычислительная нагрузка возрастает уже за счет изменения $R_{\ell b}$. Поэтому масштабируемость модели по числу пользователей является линейной, а масштабируемость по размерности пространства критериев ограничивается ростом базы правил.

Для машиностроительного предприятия с тысячами пользователей целесообразно использовать пакетный режим обработки. В этом режиме:

1. данные пользователей считываются из единого источника;
2. выполняется проверка пропусков и корректности диапазонов;
3. четкие критерии передаются непосредственно в FIS;
4. лингвистические оценки предварительно преобразуются в числовые эквиваленты по единому алгоритму;
5. для каждой строки данных последовательно выполняются расчеты по блокам каскада;

6. индивидуальные оценки сохраняются в выходном массиве;
7. рассчитываются среднее значение, медиана, стандартное отклонение и распределение оценок.

Средняя оценка по предприятию определяется как:

$$\bar{K} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N K_r$$

где K_r – интегральная оценка для r -го пользователя; N – число пользователей.

Для крупного машиностроительного предприятия рекомендуется дополнительно рассчитывать стандартное отклонение:

$$s_K = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N (K_r - \bar{K})^2}$$

Это позволит отличить высокую среднюю оценку при согласованных ответах пользователей от такой же средней оценки, полученной при значительном разбросе мнений.

Меры обеспечения масштабируемости

Для применения модели на крупных машиностроительного предприятиях предлагается использовать следующие меры:

- сохранять каскадную, а не одноуровневую архитектуру;
- ограничивать число термов тремя–пятью для одного критерия;
- формировать правила для содержательно возможных комбинаций;
- использовать единый шаблон функций принадлежности для однотипных критериев;
- разделять базу знаний на независимые FIS-файлы;
- выполнять пакетную обработку данных вместо запуска модели отдельно вручную для каждого пользователя;
- проверять входные данные и удалять дублирующиеся операции;
- хранить результаты блоков первого и второго уровней;

- применять параллельную обработку строк при существенном увеличении числа пользователей;
- проводить периодический аудит правил и функций принадлежности;
- при росте числа критериев добавлять новые блоки каскада, а не расширять одну общую базу правил.

Средства MATLAB Fuzzy Logic Toolbox поддерживают настройку входов, выходов, функций принадлежности, правил и FIS-блоков, а также работу с нечеткими системами типа 1 и типа 2, что позволяет использовать их как основу для дальнейшего расширения модели.

Таким образом, разработанная модель обладает различной масштабируемостью по числу пользователей и по числу критериев. При увеличении количества пользователей база знаний и структура каскадной модели сохраняются неизменными, а вычислительная сложность возрастает линейно, пропорционально числу обрабатываемых наборов данных. При увеличении числа критериев и лингвистических термов возникает комбинаторный рост потенциального количества правил. Для предотвращения данного роста используется каскадная архитектура, в которой критерии распределяются между локальными блоками, а результаты промежуточного вывода передаются на последующие уровни. Для разработанной структуры верхняя оценка числа правил составляет 138 вместо 177147 правил для эквивалентной одноуровневой модели с 11 критериями и тремя термами на каждый критерий. Это обеспечивает возможность применения модели на крупных промышленных предприятиях с тысячами пользователей при условии пакетной обработки данных, централизованного управления базой знаний и периодической проверки функций принадлежности и правил.

4.5. Оптимизация архитектуры системы управления производством методом комбинаторной оптимизации

В работе предлагается для решения задачи поиска оптимального расположения компонентов интерфейса использовать метод комбинаторной опти-

мизации – Pareto simulated annealing [170]. В общем виде задачу можно сформулировать следующим образом: из заданного множества комбинаций расположения компонентов с несколькими свойствами требуется отобрать такое подмножество решений, при котором критерии оптимизации будут стремиться к заданным значениям. Например, длина маршрута блуждания взгляда пользователя будет минимальной (S_i), ЧСС будет в пределах нормальных значений (CCR_i) и также время до целевого действия (t_i) будет минимальным, т.е.:

$$\begin{aligned} S_i(t) &\rightarrow \min, \\ CCR_i(t) &\rightarrow NORMAL \\ t_i &\rightarrow \min \end{aligned}$$

Пусть имеется набор сочетаний, каждый из которых имеет три параметра: длина маршрута блуждания взгляда пользователя, среднее значение ЧСС, время до целевого действия. Таким образом, имеется n возможных сочетаний расположения компонентов интерфейса, для каждого определено:

- функция распределения длины маршрута блуждания взгляда:

$$F_1(x) = \int_{i=1}^k f_1(t)$$

- функция распределения значений ЧСС:

$$F_2(x) = \int_{i=1}^k f_2(t)$$

- функция распределения времени до целевого действия:

$$F_3(x) = \int_{i=1}^k f_3(t)$$

Задача многокритериальной оптимизации представляет собой вектор: $f_i = (f_1, f_2, \dots, f_m)$, где любая компонента f_i является определенным решением по расположению компонентов интерфейса, а функции $f_1, f_2, \dots, f_m$ являются функциями зависящими от исследуемых параметров СУ.

Для определения целевой функции, которую нужно оптимизировать, необходимо составить суперпозицию функций с некоторыми весовыми коэффициентами λ_i , которые определяют оптимизация какой функции предпочтительнее:

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \\ f_i = \lambda_1 \cdot f_1 + \lambda_2 \cdot f_2 + \lambda_3 \cdot f_3 \end{cases}$$

где f_1 - целевая функция длины маршрута блуждания, f_2 - функция пути средних значений ЧСС, f_3 - функция времени до целевого действия, λ_1 - весовой коэффициент функции длины маршрута блуждания, λ_2 - весовой коэффициент функции средних значений ЧСС, λ_3 - весовой коэффициент среднего времени до целевого действия.

Если каждому набору сочетаний присвоить номер от 1 до n , то целевая функция будет выражать порядок расположения компонентов интерфейса, при котором ЧСС в пределах нормы, а время до целевого действия стремиться к $\min$.

Для использования модуля поиска оптимального решения по Парето необходимо произвести нормирование значений f_1 , f_2 , f_3 . Для этого необходимо рассчитать относительные значения:

$$f_1 = \frac{f_{1\min}}{f_1'},$$

где f_1' - текущее значение f_1 , $f_{1\min}$ - минимальное значение f_1 ;

$$f_2 = \frac{f_{2\text{normal}}}{f_2'},$$

где f_2' - текущее значение f_2 , $f_{2\text{normal}}$ - нормальное значение f_2 ;

$$f_3 = \frac{f_{3\min}}{f_3'},$$

где f_3' - текущее значение f_3 , $f_{3\min}$ - минимальное значение f_3 .

Математическая модель при решении поставленной задачи с использованием модуля поиска оптимального решения по Парето будет выглядеть следующим образом:

1. Определение конечного набора значений оптимизируемых функций f_1, f_2, f_3
2. Нахождение значений аргументов f_1, f_2, f_3 и определение значений весовых коэффициентов.
3. Формированием алгоритма вычисления оптимизируемой функции f_i : если новое решение x_n лучше предыдущего решения x_{n-1} , то x_n добавляется к множеству потенциально эффективных решений M . Решения x_n , которые оказываются хуже x_{n-1} , удаляются из множества M . Если новое решение x_n не лучше предыдущего решения x_{n-1} , то вероятность принятия x_n равна,

$$P(x_n, x_{n-1}, T_x, \Lambda_x) \propto \min \left\{ 1, \exp \left(\sum_{\omega=1}^{\Omega} \frac{\lambda_{\omega}^x (f_{\omega}(x_{n-1}) - f_{\omega}(x_n))}{T_x} \right) \right\},$$

где ω – одна из задач множества Ω , рассматриваемых для оптимизации;

f_i – целевая функция для задачи ω ;

T_x - набора компоновки элементов интерфейса:

Λ_x - вектор использованных весов λ_{ω}^x для решений x .

При этом значения весовых коэффициентов варьируются в ходе итерационного поиска для исследования всего множества не доминирующих решений (то есть множества эффективных решений или фронта Парето). Более высокий вес, связанный с целью ω , подразумевает более высокую вероятность улучшения ω . Сумма всех объективных весов равна единице.

Алгоритм 1 изображает псевдокод последовательность поиска оптимального решения по Парето (Pareto simulated annealing), который адаптирован для оптимизации компоновки элементов интерфейса с учетом длинна маршрута блуждания взгляда пользователя (S_i), ЧСС (CCR_j) и времени до целевого действия (t_k).

Алгоритм начинается со случайного генерирования начального набора компоновки элементов интерфейса T_x (см. строки 1-2). Затем для каждой из генерируемых компоновок мы проверяем доминирование (то есть проверяем, является ли уровень стресса или длина маршрута блуждания взгляда лучше) и обновляем набор лучших конфигураций M ; все решения, удаляются из M , если

имеют либо больший уровень стресса, либо большую длину маршрута блуждания взгляда, и добавляется новая конфигурация интерфейса. Строки 5-21 показывают основной цикл алгоритма, который выполняется до тех пор, пока значения уровня ЧСС не станут нормальными. Затем мы делаем петлю вокруг всех конфигураций интерфейса генерируем новое решение x_n (строка 7), проверяем, доминирует ли оно над x_{n-1} , и соответственно обновляем набор лучших конфигураций интерфейса (строка 8). После этого обновляются веса для каждой цели x_n (строка 11 - 17). На первой итерации устанавливается вес для каждой цели случайным образом (строка 19). Функция вероятности $P(x_n, x_{n-1}, T, \Lambda_x)$ используется для принятия решения о необходимости обновления решения x_n с помощью вновь сгенерированного решения x_{n-1} (строка 20).

Алгоритм 1: Последовательность поиска оптимального решения по Парето

Data: набор интерфейсов

Result: Конфигурация интерфейсов

```

1 set initial interface layout options  $T_x$ ;
2 randomly generate an initial set of configurations  $X$ ;
3 foreach  $x_n \in X$  do
4   check for dominance and update the set of best cabinet configurations  $M$ ;
5 while  $T_x > 1$  do
6   foreach  $x_n \in X$  do
7     generate new cabinet configuration  $x_n$ ;
8     if  $x_n$  dominates  $x_{n-1}$  then;
9       update the set of the best cabinet configurations  $M$ ;
10      if not the first iteration then
11        update objective weights such that:
12        if objective of  $x_n \geq$  objective of  $x_{n-1}$  then
13          multiply the corresponding objective weight by  $c$ ;
14        else
15          divide the corresponding objective weight by  $c$ ;
16        ... // Do the same for all objectives
17        update weights of  $x_n$ ;
18      else
19        set random weight values;
20    use the probability function  $P(x_n, x_{n-1}, T_x, \Lambda^s)$  to decide whether to update  $M$ 
    with  $x_n$  // see eq. 2
21    initial interface layout options TSA according to the plan.
```


4.6. Построение архитектуры системы управления производством на основе автономных элементов

В качестве примера проектирования производства с помощью холонического подхода рассмотрим производственную систему, состоящую из 7 элементов (рисунок 54):

- потребитель, который делает заказ на производство какого-либо продукта;
- HMS, внутри которой располагаются 4 холона;
- холон заказов, отвечающий за планирование;
- ресурсный холон, отвечающий за ресурсы;
- продуктовый холон, содержащий необходимую для производства продуктов информацию;
- холон цеха, непосредственно связанный с продуктовым холоном и отвечающий за производство продукта;
- DWH (Data Warehouse, хранилище данных), обеспечивающая информационную поддержку для всех вышеперечисленных элементов.

Как видно 4 холона и сама HMS находятся в едином контуре, обозначенном пунктирной линией. Пунктирная линия, как и направленные стрелки, передают взаимодействие 4 холонов внутри HMS. Направленные стрелки передают характер взаимодействия между всеми элементами схемы [114].

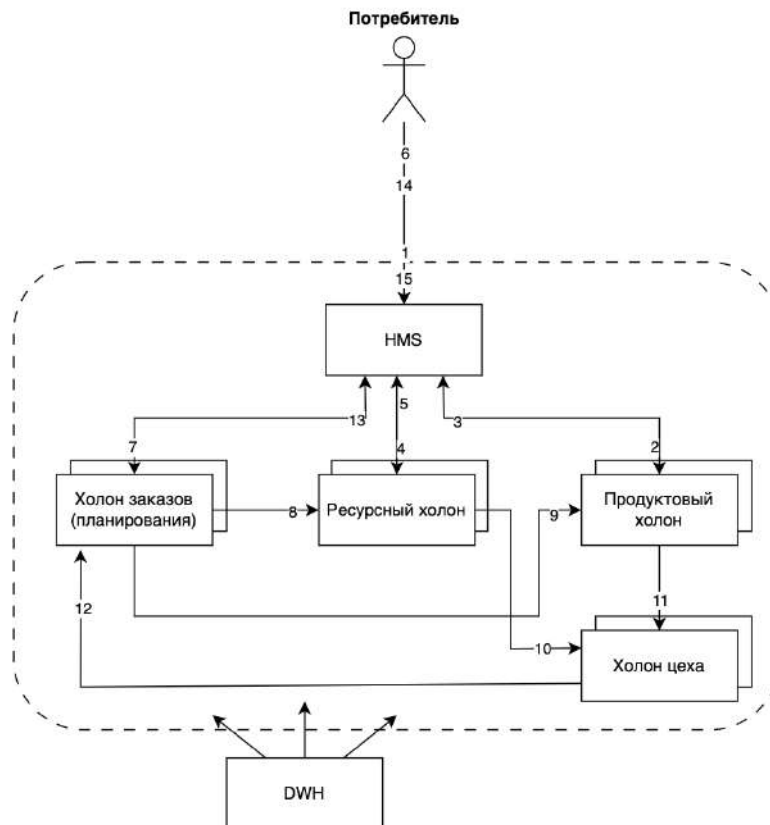


Рисунок 54 - Схема процессов HMS: 1 - заказ от потребителя, 2 - проверка возможности сделать заказ, 3 - ответ HMS по производственным возможностям, 4 - проверка наличия ресурсов, 5 - ответ HMS по ресурсным возможностям, 6 - уведомление потребителя о возможности выполнить заказ, 7 - определение плана производства заказа, 8 - планирование ресурсов, 9 - определение технологического плана производства, 10 - выделение ресурсов на производство, 11 - передача плана на производство, 12 - передача готовой детали, 13 - передача информации о заказе HMS, 14 - информирование потребителя о выполнении заказа, 15 - оплата заказа.

Потребитель, находящийся внутри HMS, делает заказ на производство какого-либо продукта. HMS дает задание продуктивному холону проверить возможность произвести заказ, т. е. наличие соответствующих технологий, технологических карт и спецификаций. Продуктовый холон отвечает HMS о возможности или невозможности произвести продукт, после чего HMS делает запрос ресурсному холону о наличии соответствующих ресурсов для производ-

ства заказа. Ресурсный холон отвечает HMS, и уведомляет потребителя о возможности выполнить заказ. Далее холон заказа составляет план на производство, запрашивая технологический план, спецификации у продуктового холона и ресурсы у ресурсного холона. В холон цеха направляются план производства, ресурсы, способы и методы производства. В холоне цеха производится заказ, информация об этом передается в холон заказа, далее в HMS и далее потребителю. Потребитель, в свою очередь, производит расчеты с HMS.

Элемент DWH находится обособленно от всей системы, так как аккумулирует всю информацию о ней и обеспечивает информационное взаимодействие элементов, аналитику, поддержку принятия решений.

Функции элементов HMS можно представить в виде диаграммы прецедентов (рисунок 55).

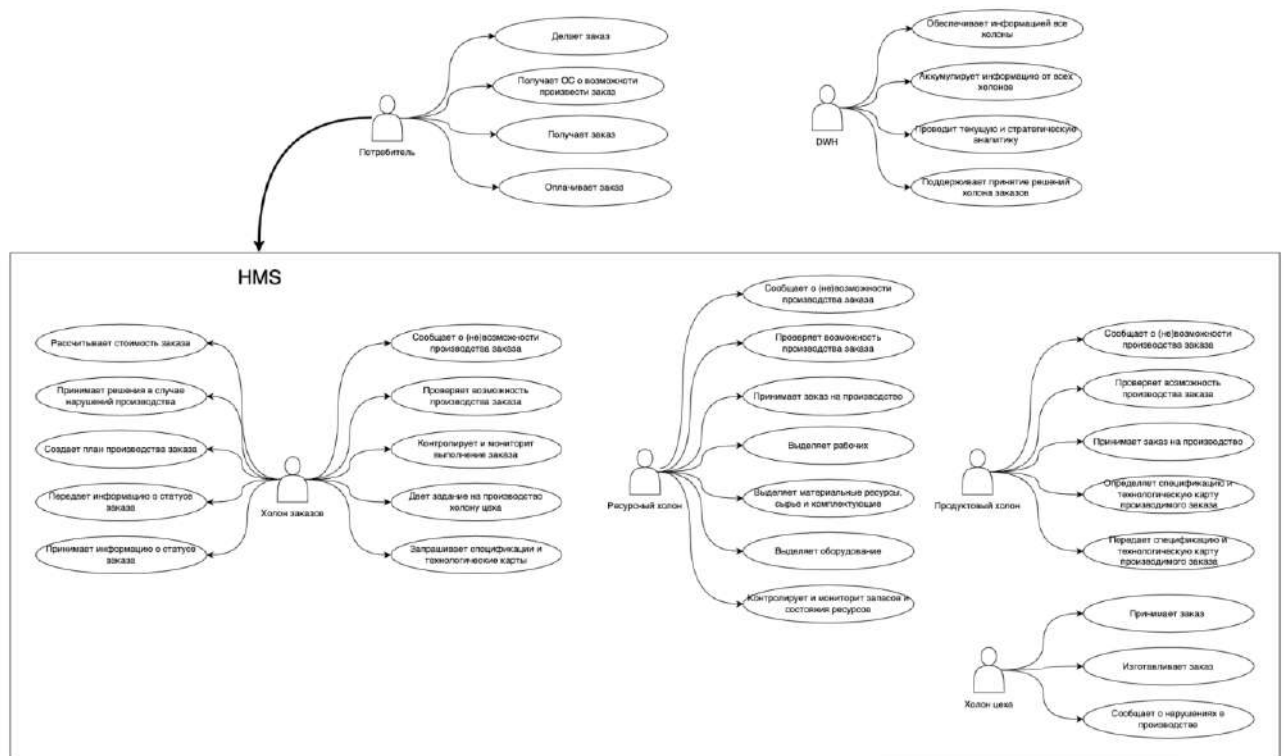


Рисунок 55 - Диаграмма прецедентов HMS

Как и на рисунке 96, потребитель взаимодействует с HMS, а DWH находится обособленно.

Все элементы холонической производственной системы можно описать в виде классов, содержащих в себе информацию и функции. Диаграмма классов HMS в нотации UML представлена на рисунке 56.

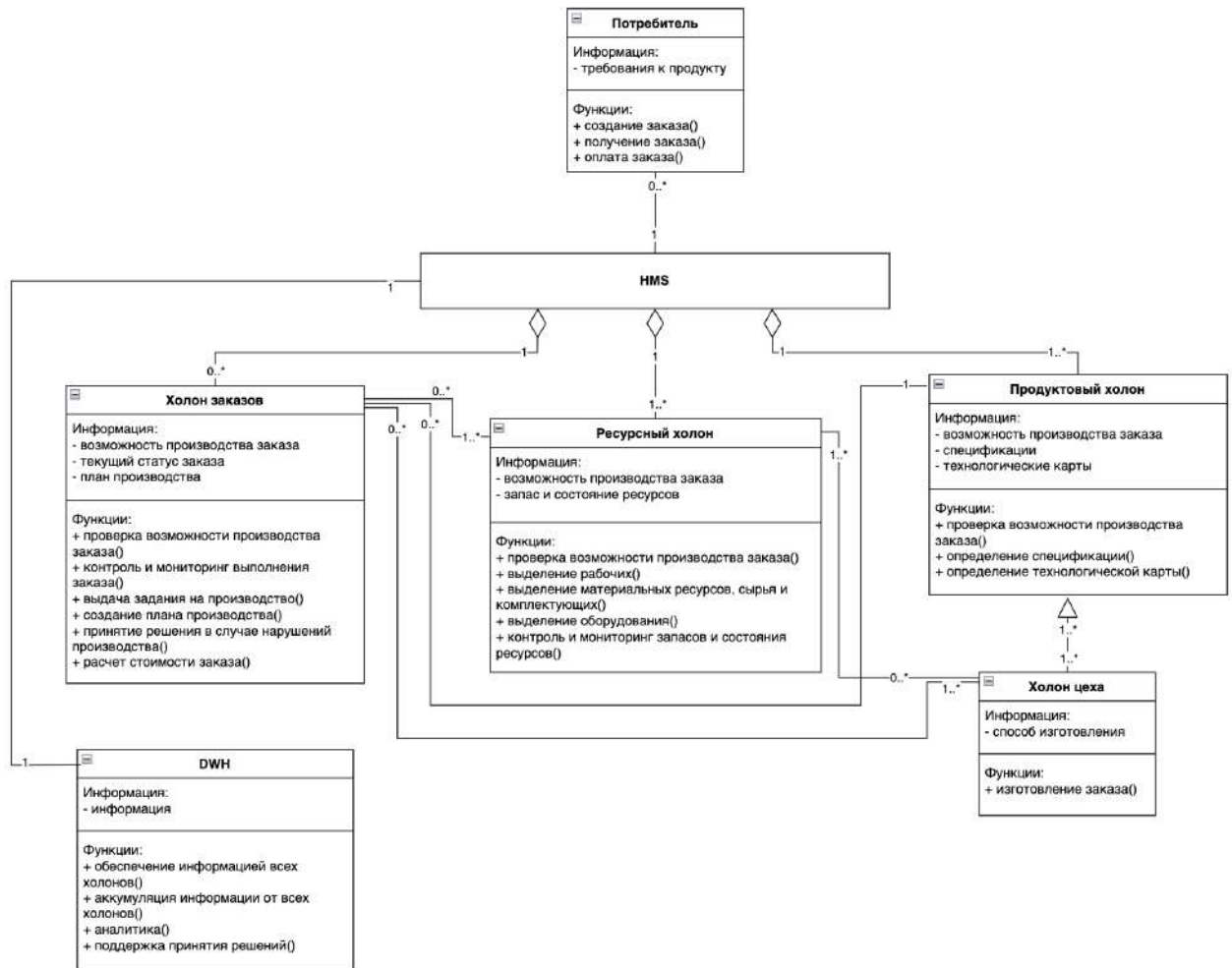


Рисунок 56 - Диаграмма классов HMS

Потребитель связан с одной HMS, т.к. на предприятии может быть только одна холоническая система. Любые две и более холонические системы на предприятии всегда взаимодействуют друг с другом и являются холонами для системы высшего уровня.

HMS содержит в себе один или более ресурсный холон, а также один или более продуктовый холон. Ресурсы и методы/способы производства являются необходимыми элементами, без которых работа производственной системы невозможна. Что же касается холона заказов, то в определенные моменты времени производственная система может не иметь ни одного заказа, соответственно, не будет производиться планирование.

Холон заказов связан с ресурсным холоном и с холоном цеха, а также с продуктовым холоном, который должен всегда быть один. Нарушение единичности продуктового холона для холона заказов влечет за собой очереди, неопределенность и нарушение производства.

Холон цеха наследует методы продуктового холона, т.к. без знаний о том, как производить заказ, деятельность холона цеха существовать не может. Можно представить в виде холорхической структуры, работа которой будет направления на достижения глобальной цели.

Полученная в результате архитектура обладает высокой степенью самоподобия, что снижает сложность интеграции новых компонентов и обеспечивает легкую реконфигурацию системы. Это позволяет отдельным ресурсным холонам принадлежать к нескольким холархиям на нескольких иерархических уровнях.

Для оценки надежности необходимо определить вероятности состояний СУ, если она состоит из нескольких модулей, при плотности потока отказов на каждый модуль $\lambda = 0,01$ в/сутки и плотности потока восстановлений $\mu = 0,05$ в/сутки.

Имеем $a = \frac{0,01}{0,05} = 0,2$. Получим соответственно:

$$P_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{1} + \frac{0,2}{1} + \frac{0,2^2}{2!} + \frac{0,2^3}{3!}\right)} = \frac{1}{1,22133} = 0,8188,$$

$$P_1 = \frac{0,2}{1,22133} = 0,1638,$$

$$P_2 = \frac{\frac{0,2^2}{2}}{1,22133} = 0,0164,$$

$$P_3 = \frac{\frac{0,2^3}{6}}{1,22133} = 0,0011.$$

Вероятность того, что хотя бы один из модулей будет работоспособным равна $P_{Б0} = P_3 = 1 - 0,0011 = 0,9989$.

Отметим, что в рассмотренном предельном случае вероятности состояний не зависят от времени эксплуатации системы управления производством.

Если бы не было процесса восстановления, то вероятности отказа каждого элемента возрастали бы пропорционально времени эксплуатации.

Чтобы определить, как изменяется вероятность безотказной работы СУ – $P_{\text{БО}}$ от времени без процессов восстановления при определенных параметрах, необходимо определить вероятность отказа одного элемента согласно свойствам экспоненциального закона равна $q = 1 - e^{-\lambda t}$. Вероятность отказа для $m = 3$ элементов из $n = 3$ элементов согласно закона Пуассона будет равна $q_3 = \frac{(\lambda \cdot t) \cdot m}{m!} \cdot \exp(-n \cdot \lambda \cdot t)$ при $m! = 3! = 6$, а согласно биномиального закона $q_3 = C_n^m \cdot q^m \cdot p^{n-m}$. При $m = n = 3$ $q_3 = q^m = q^{3m}$, где $q = 1 - \exp(-\lambda \cdot t)$.

Результаты расчета приведены в табл. 4. В данной таблице 12 $P_{\text{БО}}$ соответствует расчету по закону Пуассона, а $P_{\text{БО}}^*$ - по экспоненциальному закону согласно схеме испытаний Бернулли.

Таблица 12 – Расчет вероятности безотказной работы

t	$\lambda t n$	$(\lambda t n)^3$	$e^{-\lambda t n}$	P_m	$P_{\text{БО}}$	λt	$e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t} = q$	q^m	$P_{\text{БО}}^*$
10	0,3	0,27	0,74	0,0033	0,9967	0,1	0,905	0,095	0,0009	0,9991
20	0,6	0,216	0,55	0,02	0,9798	0,2	0,7187	0,1813	0,006	0,994
40	1,2	1,728	0,30	0,087	0,9132	0,4	0,67	0,33	0,035	0,964
60	1,8	5,832	0,165	0,160	0,839	0,6	0,52	0,48	0,11	0,889
100	3	27	0,049	0,224	0,776	1,0	0,37	0,63	0,25	0,75
120	3,6	46,7	0,027	0,21	0,79	1,2	0,30	0,70	0,34	0,66
140	3,9	59,3	0,02	0,198	0,802	1,4	0,24	0,76	0,43	0,57

При некоторых соотношениях $a = \lambda \cdot t$ данные кривые весьма существенно не совпадают. Так график, соответствующий закону Пуассона, после $T = 120$ начинает возрастать, что не отвечает никаким логическим соображениям. Наиболее точно расчет получается при применении схемы испытаний Бернулли. При моделировании производственных процессов следует учитывать, что применение МСП с достаточной для практики точностью возможно только при относительно малых величинах $a = \lambda \cdot t$

Величина $P_{\text{Б0}} = 0,9989$ достигается при отсутствии обслуживания уже через 10 суток и далее начинает резко уменьшаться.

В действительности, плотность потока восстановлений может быть сравнима с плотностью потока отказов, тогда количество невосстановленных элементов на данный момент времени будет возрастать и многие отказы будут устраняться с задержкой.

Также необходимо рассчитать модель надежности с учетом уровня стресса оператора S .

Известно, что при выполнении заданий у 75% пользователей наблюдалось повышение ЧСС на 34,6% (с 74 до 102 уд./мин), что коррелировало с совершением ошибок. На основании этих данных можно принять:

при $S = 0$ (стресса нет): $\lambda_H(0) = 0$;

при $S = 0.5$ (умеренный стресс): $\lambda_H(0.5) \approx 0.3 \cdot \lambda_T$;

при $S = 1.0$ (сильный стресс): $\lambda_H(1.0) \approx 1.5 \cdot \lambda_T$.

На основании данных (повышение ЧСС на 22,9% на 4–8 минуте, на 37,8% на 20-й минуте) можно аппроксимировать функцию $S(t)$ кусочно-линейной функцией:

$$S(t) = \begin{cases} 0.1 + 0.05t, & 0 \leq t < 8 \text{ мин;} \\ 0.5 + 0.02(t - 8), & 8 \leq t < 20 \text{ мин;} \\ 0.74 + 0.01(t - 20), & t \geq 20 \text{ мин.} \end{cases}$$

При оптимизации интерфейса показано, что компоновка элементов интерфейса снижает:

- длину маршрута блуждания взгляда на 15–25%;
- время до целевого действия на 20–30%;
- уровень стресса (ЧСС) на 10–15%.

Пусть:

$\lambda_T = 0,01$ отказов/сутки (базовый параметр технических отказов);

$\alpha = 0,003$, $\beta = 2,5$ (эмпирические коэффициенты);

$HR_{\text{rest}} = 74$ уд./мин, $HR_{\text{max}} = 180$ уд./мин;

$\mu = 0,5$ восстановлений/сутки;

$n = 3$ (система с 3 элементами).

Сценарий 1: Стандартный интерфейс, стресс $S = 0.5$

$$\lambda_H(0.5) = 0.003 \cdot e^{2.5 \cdot 0.5} = 0.003 \cdot e^{1.25} \approx 0.0105 \text{ отказов/сутки.}$$

$$\lambda_{total} = 0.01 + 0.0105 = 0.0205 \text{ отказов/сутки, } \rho = 0.0205/0.5 = 0.041.$$

$$P_{отк}(0.5) = 0.041^3 / (3! \cdot (1 + 0.041 + 0.041^2/2 + 0.041^3/6)) \approx 0.000011.$$

Сценарий 2: Оптимизированный интерфейс, стресс $S = 0.35$

$$\lambda_H(0.35) = 0.003 \cdot e^{2.5 \cdot 0.35} = 0.003 \cdot e^{0.875} \approx 0.0072 \text{ отказов/сутки.}$$

$$\lambda_{total} = 0.01 + 0.0072 = 0.0172 \text{ отказов/сутки, } \rho = 0.0172/0.5 = 0.0344.$$

$$P_{отк}(0.35) = 0.0344^3 / (3! \cdot (1 + 0.0344 + 0.0344^2/2 + 0.0344^3/6)) \approx 0.000006.$$

Таким образом оптимизация интерфейса по Парето снижает вероятность отказа системы на 45% (с 0.000011 до 0.000006) за счет снижения уровня стресса оператора.

Механизм гибридного подхода к выбору оптимальной конфигурации системы управления машиностроительным производством

На основании проведенного анализа установлено, что система управления машиностроительным производством может быть представлена как состоящая из множества автономных элементов-холонов:

- Холон заказов (Order Holon) – отвечает за планирование заказов;
- Ресурсный холон (Resource Holon) – управляет ресурсами производства;
- Продуктовый холон (Product Holon) – содержит информацию о продуктах и технологиях;
- Холон цеха (Workshop Holon) – непосредственно производит продукцию;
- HMS (Holonc Manufacturing System) – координирует взаимодействие холонов;
- DWH (Data Warehouse) – обеспечивает информационную поддержку и аналитику.

Каждый холон оценивается на трех уровнях архитектуры:

- Внешний уровень: семантический анализ требований, эргономика интерфейса (ЧСС, айтрекинг, время до целевого действия);
- Концептуальный уровень: качество алгоритмов;
- Внутренний уровень: надежность, производительность, технологичность.

При этом часть параметров оценивается четкими критериями (время работы алгоритма, объем памяти, вероятность безотказной работы), а часть – нечеткой логикой (уровень стресса пользователей, удовлетворенность, гибкость управления, доступность информации).

Для выбора оптимальной конфигурации СУ (комбинации холонов с наилучшими показателями) предлагается механизм гибридного подхода, основанный на нечетком логическом выводе (НЛВ) и многокритериальной оптимизации по Парето.

Формализация параметров оценки холонов

Пусть каждый холон H_i ($i = 1, \dots, 6$) характеризуется набором параметров на трех уровнях архитектуры.

Внешний уровень (L_{ext}):

- R_i – количество формализованных требований (четкий);
- $S_{stress,i}$ – уровень стресса пользователей при работе с интерфейсом холона (нечеткий: «Низкий», «Средний», «Высокий»);
- $S_{sat,i}$ – удовлетворенность пользователей (нечеткий: «Низкая», «Средняя», «Высокая»);
- $T_{target,i}$ – время до целевого действия (четкий, сек);
- $L_{eye,i}$ – длина маршрута блуждания взгляда (четкий, см).

Концептуальный уровень (L_{conc}):

- $A_{alg,i}$ – алгоритм оптимизации, используемый в холоне;
- $T_{alg,i}(N)$ – время работы алгоритма при N точках заказа (четкий, сек);
- $L_{route,i}(N)$ – длина маршрута доставки (четкий, м);
- $M_{alg,i}(N)$ – объем используемой памяти (четкий, КВ);
- $E_{alg,i}$ – эффективность алгоритма (нечеткий: «Низкая», «Средняя», «Высокая»).

Внутренний уровень (L_{int}):

- $P_{reliab,i}$ – вероятность безотказной работы (четкий);
- $P_{perf,i}$ – производительность системы (четкий, операций/сек);

- $F_{flex,i}$ – гибкость управления (нечеткий: «Плохая», «Нормальная», «Отличная»);
- $I_{avail,i}$ – доступность информации (нечеткий: «Плохая», «Нормальная», «Отличная»);
- $I_{acc,i}$ – точность предоставления информации (нечеткий: «Плохая», «Нормальная», «Отличная»).

Обобщенная оценка холона H_i представляется как вектор:

$$H_i = (L_{ext,i}, L_{conc,i}, L_{int,i})$$

Нечеткая оценка параметров холонов

Для параметров, оцениваемых нечеткой логикой, используются функции принадлежности. Например, для критерия «Уровень стресса пользователей» S_{stress} :

- Терм «Низкий»: $\mu_{Low}(x) = \text{gaussmf}(x,)$;
- Терм «Средний»: $\mu_{Med}(x) = \text{gaussmf}(x,)$;
- Терм «Высокий»: $\mu_{High}(x) = \text{gaussmf}(x,)$,

где x – значение ЧСС (уд./мин).

Аналогично определяются функции принадлежности для остальных нечетких параметров.

Дефазификация нечетких параметров осуществляется методом *mom* (mean of maximum), алгоритм НЛВ – Mamdani.

Каскадная схема нечеткого логического вывода (Приложение Г).

Для интегральной оценки каждого холона применяется каскадная схема НЛВ (аналогично разделу 4.3), состоящая из трех уровней композиции:

Уровень 1 (5 блоков):

- Блок 1.1: Предрасположенность к отказам (четкий) + Гибкость управления (нечеткий) → Организационная система;
- Блок 1.2: Уровень стресса (нечеткий) + Удовлетворенность (нечеткий) + Предрасположенность к ошибкам (четкий) → Индивидуальные качества системы;

- Блок 1.3: Доступность информации (нечеткий) + Точность информации (нечеткий) → Обращение информации;
- Блок 1.4: Производительность (четкий) → Технологичность;
- Блок 1.5: Фильтры (нечеткий) + Эффективность (нечеткий) + Целесообразность (нечеткий) → Системность.

Уровень 2 (2 блока):

- Блок 2.1: Организационная система + Индивидуальные качества + Обращение информации → Сервисзначимые параметры;
- Блок 2.2: Технологичность + Системность → Технические параметры.

Уровень 3 (1 блок):

- Блок 3.1: Сервисзначимые параметры + Технические параметры → Комплексная оценка холона Q_i (баллы, 0–100).

Результатом оценки каждого холона H_i является комплексный балл

Формирование множества конфигураций СУ машиностроительным производством

Пусть для каждого типа холона существует множество альтернативных реализаций (например, несколько вариантов ресурсного холона с разными алгоритмами, интерфейсами, параметрами надежности):

- $\mathcal{H}_{order} = \{H_{order}^{(1)}, H_{order}^{(2)}, \dots\}$ – множество холонов заказов;
- $\mathcal{H}_{resource} = \{H_{resource}^{(1)}, H_{resource}^{(2)}, \dots\}$ – множество ресурсных холонов;
- $\mathcal{H}_{product} = \{H_{product}^{(1)}, H_{product}^{(2)}, \dots\}$ – множество продуктовых холонов;
- $\mathcal{H}_{workshop} = \{H_{workshop}^{(1)}, H_{workshop}^{(2)}, \dots\}$ – множество холонов цеха;
- $\mathcal{H}_{HMS} = \{H_{HMS}^{(1)}, H_{HMS}^{(2)}, \dots\}$ – множество HMS;
- $\mathcal{H}_{DWH} = \{H_{DWH}^{(1)}, H_{DWH}^{(2)}, \dots\}$ – множество DWH.

Конфигурация СУ определяется как комбинация по одному холону каждого типа:

$$C = (H_{order}, H_{resource}, H_{product}, H_{workshop}, H_{HMS}, H_{DWH}),$$

где $H_{order} \in \mathcal{H}_{order}$, $H_{resource} \in \mathcal{H}_{resource}$, и т.д.

Множество всех возможных конфигураций $\mathcal{C}$ равно декартову произведению множеств холонов:

$$\mathcal{C} = \mathcal{H}_{order} \times \mathcal{H}_{resource} \times \mathcal{H}_{product} \times \mathcal{H}_{workshop} \times \mathcal{H}_{HMS} \times \mathcal{H}_{DWH}.$$

Многокритериальная оптимизация выбора конфигурации

Для выбора оптимальной конфигурации $C^* \in \mathcal{C}$ решается задача многокритериальной оптимизации по Парето.

Критерии оптимизации:

- $Q_{total}(C)$ – суммарная комплексная оценка всех холонов в конфигурации (максимизация);
- $T_{total}(C)$ – общее время работы алгоритмов оптимизации в конфигурации (минимизация);
- $L_{total}(C)$ – суммарная длина маршрутов доставки (минимизация);
- $M_{total}(C)$ – общий объем используемой памяти (минимизация);
- $P_{reliab}(C)$ – вероятность безотказной работы конфигурации (максимизация).

Целевая функция:

$$F(C) = w_Q \cdot \frac{Q_{total}(C)}{Q_{max}} - w_T \cdot \frac{T_{total}(C)}{T_{max}} - w_L \cdot \frac{L_{total}(C)}{L_{max}} - w_M \cdot \frac{M_{total}(C)}{M_{max}} + w_P \cdot \frac{P_{reliab}(C)}{P_{max}},$$

где $w_Q + w_T + w_L + w_M + w_P = 1$ — весовые коэффициенты важности критериев.

Оптимальная конфигурация C^* определяется как:

$$C^* = \arg \max_{C \in \mathcal{C}} F(C).$$

Гибридный механизм выбора конфигурации

Механизм гибридного подхода реализуется в четыре этапа:

Этап 1. Оценка альтернативных холонов. Для каждого холона $H_i^{(j)}$ из множеств $\mathcal{H}_{order}, \mathcal{H}_{resource}, \dots$ рассчитывается комплексная оценка $Q_i^{(j)}$ методом НЛВ.

Этап 2. Формирование множества конфигураций. Генерируется множество всех возможных конфигураций $\mathcal{C}$.

Этап 3. Предварительный отбор по Парето. Из множества $\mathcal{C}$ выделяется множество Парето-оптимальных конфигураций $\mathcal{C}_{Pareto}$ — конфигураций, не доминируемых другими по всем критериям одновременно:

$$\mathcal{C}_{Pareto} = \{C \in \mathcal{C} \mid \nexists C' \in \mathcal{C}: C' \succ C\},$$

где $C' \succ C$ означает, что конфигурация C' доминирует C (лучше или равна по всем критериям и строго лучше хотя бы по одному).

Этап 4. Выбор оптимальной конфигурации. Из множества $\mathcal{C}_{Pareto}$ выбирается конфигурация C^* с максимальным значением целевой функции $F(C)$.

Адаптивный механизм переключения конфигураций

Помимо предварительного выбора конфигурации, предлагается механизм адаптивного переключения в процессе эксплуатации СУ.

Условие переключения 1 (изменение количества требований). Если количество формализованных требований R увеличивается и выходит за диапазон эффективности текущей конфигурации $\mathcal{C}_{curr}$, инициируется переключение на конфигурацию $\mathcal{C}_{new}$ с более масштабируемыми холонами:

$$\text{если } R > R_{max}(\mathcal{C}_{curr}), \text{ то } \mathcal{C}_{curr} \leftarrow \mathcal{C}_{new}, \text{ где } R_{max}(\mathcal{C}_{new}) > R.$$

Условие переключения 2 (изменение количества точек заказа). Если среднее количество точек заказа N увеличивается, производится переключение на конфигурацию с более производительными алгоритмами оптимизации:

$$\text{если } N > N_{max}(\mathcal{C}_{curr}), \text{ то } \mathcal{C}_{curr} \leftarrow \mathcal{C}_{new}, \text{ где } N_{max}(\mathcal{C}_{new}) > N.$$

Условие переключения 3 (ухудшение эргономики). Если фиксируется устойчивое повышение уровня стресса пользователей ($\overline{\text{ЧСС}} > 100$ уд./мин) или увеличение времени до целевого действия более чем на 30%, инициируется переключение на конфигурацию с оптимизированными интерфейсами холонов (Pareto simulated annealing):

$$\text{если } \overline{\text{ЧСС}} > 100 \text{ или } \overline{T_{target}} > 1.3 \cdot T_{target}^{norm}, \text{ то } \mathcal{C}_{curr} \leftarrow \mathcal{C}_{new}.$$

Условие переключения 4 (снижение надежности). Если вероятность безотказной работы конфигурации $P_{reliab}(C_{curr})$ падает ниже порогового значения $P_{threshold}$, производится переключение на конфигурацию с более надежными холонами:

$$\text{если } P_{reliab}(C_{curr}) < P_{threshold}, \text{ то } C_{curr} \leftarrow C_{new}, \\ \text{где } P_{reliab}(C_{new}) > P_{reliab}(C_{curr}).$$

Алгоритм гибридного выбора конфигурации

Алгоритм 4 изображает псевдокод последовательности выбора и переключения конфигурации СУ машиностроительным производством при гибридном подходе (приложение И).

Для ускорения выбора конфигурации в режиме реального времени предлагается использовать таблицу, где для каждого сочетания (R, N) указана рекомендуемая конфигурация.

Рекомендации по выбору конфигурации холонической СУ в зависимости от R и N (таблица 13)

Таблица 13 - Выбор конфигурации СУ машиностроительного производства

Диапазон R	Диапазон N	Рекомендуемая конфигурация	Интерфейсы	Надежность
1–20	1–10	C_1 (Точная)	Стандартные	$P \geq 0.99$
1–20	11–20	C_2 (Эвристическая)	Pareto-оптимизированные	$P \geq 0.95$
1–20	21–26	C_3 (Быстрая)	Упрощенные	$P \geq 0.90$
21–50	1–10	C_1 / C_2	Стандартные / Pareto	$P \geq 0.95$
21–50	11–20	C_2 (Эвристическая)	Pareto-оптимизированные	$P \geq 0.95$
21–50	21–26	C_3 (Быстрая)	Упрощенные	$P \geq 0.90$
>50	1–10	C_2 / C_3	Pareto / Упрощенные	$P \geq 0.90$

Диапа- зон R	Диапа- зон N	Рекомендуемая кон- фигурация	Интерфейсы	Надеж- ность
>50	11–20	C_3 (Быстрая)	Упрощенные	$P \geq 0.90$
>50	21–26	C_3 (Быстрая)	Упрощенные	$P \geq 0.85$

Для реализации гибридного механизма в рамках СУ машиностроительного производства предлагается:

1. Предварительное профилирование холонов. На этапе разработки СУ проводятся эксперименты для расчета комплексных оценок Q_i каждого холона методом НЛВ.
2. Генерация множества конфигураций. В зависимости от количества альтернативных реализаций каждого холона формируется множество C . Например, при 3 вариантах холона заказов, 4 ресурсных, 2 продуктовых, 3 холона цеха, 2 HMS и 2 DWH общее число конфигураций составит $3 \times 4 \times 2 \times 3 \times 2 \times 2 = 288$.
3. Отбор по Парето. Из 288 конфигураций выделяется множество Парето-оптимальных C_{Pareto} (обычно 10–30 конфигураций).
4. Динамический мониторинг. В процессе эксплуатации СУ осуществляется мониторинг R , N , ЧСС, T_{curr} , P_{reliab} и при необходимости – переключение на оптимальную конфигурацию C^* .

Ожидаемые преимущества:

- Адаптивность. Автоматический выбор конфигурации под текущие требования (R), нагрузку (N), эргономику (ЧСС).
- Робастность. Возможность переключения при ухудшении показателей (надежность, время, стресс).
- Баланс между точностью и быстродействием. Сочетание точных алгоритмов для малых задач и эвристических для больших.
- Персонализация. Учет предпочтений пользователей через весовые коэффициенты w_Q, w_T, w_L, w_M, w_P .

Механизм гибридного подхода к выбору оптимальной конфигурации холонической системы управления машиностроительным производством включает:

- оценку каждого холона на трех уровнях архитектуры (внешний, концептуальный, внутренний) с использованием нечеткой логики;
- формирование множества всех возможных конфигураций как декартова произведения множеств холонов;
- отбор Парето-оптимальных конфигураций по многокритериальному показателю (качество, время, длина маршрута, память, надежность);
- адаптивное переключение конфигураций в процессе эксплуатации при изменении требований, нагрузки, эргономики или надежности.

Практическая реализация механизма позволит повысить эффективность СУ за счет автоматического выбора наиболее целесообразной конфигурации для каждой конкретной ситуации эксплуатации.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

Формализация требований к системе управления производством с использованием алгоритмов поисковой оптимизации и позволяет на основании проведенного анализа предметной области формировать общие требования к функциям, которые должна выполнять система.

Анализ возможности применения технологий для измерения комплекса критериев для оценки систем управления производством позволяет выявить недостатки интерфейса и заложенной логики действий в информационной системе, которые приводят к ошибкам и трудностям при решении поставленной задачи у 75% пользователей и вызывают повышение уровня стресса в среднем на 34,6%. Приведенные инструменты позволяют проводить более достоверную и независимую оценку ряда критериев, отвечающих за когнитивные факторы.

Развитие и совершенствование этих исследований будет во многом способствовать реализации таких целей как: оптимальное удовлетворение запросов и предпочтений пользователей и потребителей, повышение качества СУ.

Развитие СУ, повышение качества и удобства использования с точки зрения взаимодействия с человеком можно улучшить благодаря исследованиям психофизиологических реакций человека.

По когнитивным критериям с использованием метода комбинаторной оптимизации по Парето можно проводить оптимизацию СУ. Например, выявлять оптимальную компоновку элементов интерфейса, при котором среднее значение длины маршрута блуждания взгляда стремится к минимальному, ЧСС в пределах нормы, время до целевого действия также стремится к минимальному.

Для оценки применения поиска оптимального решения по Парето (Pareto simulated annealing) при проектировании СУ проведено исследование трех вариантов интерфейса А, В и С и результаты измерений для каждого варианта длины маршрута блуждания взгляда пользователя, ЧСС, времени до целевого действия.

Алгоритм выставляет приоритет оптимизации: сначала минимизируется длина маршрута блуждания взгляда, а затем уровень стресса, потом время до целевого действия. Во всех случаях алгоритм сначала оптимизирует длину маршрута блуждания взгляда, а при увеличении числа итераций алгоритм пытается оптимизировать и уровень стресса. Увеличение числа итераций приводит к оптимизации уровня стресса и времени до целевого действия. В результате оптимизации компоновки элементов интерфейса по Парето удалены информационно-избыточные активные элементы. Алгоритм, как часть системы управления производством, имеет сложность $O(f(n))$, если при увеличении размерности входных данных n , то время выполнения алгоритма возрастает с той же скоростью, что и функция $f(n)$.

По результатам проведенного исследования каждый из выбранных для рассмотрения алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки, поэтому могут быть применимы при различных условиях и ограничениях. Метод ветвей и границ, который близок к простому перебору, имеет ограничения по коли-

честву точек маршруту, а именно не более 10, из-за экспоненциально возрастающего времени вычисления. Однако маршрут, вычисляемый в пределах 10 точек, наиболее близок к эталонному, при сравнительно небольших затратах вычислительных ресурсов. Эвристические методы, представленные в статье муравьиным и генетическим алгоритмом, показывают хорошие результаты при большем наборе точек. При этом ГА менее ресурсоемкий, а МА более точен. Исходя из полученных результатов, комбинация этих методов при решении практических задач будет наиболее предпочтительна.

Метод динамического программирования в связи с экспоненциальным ростом времени вычислений применим для малых выборок точек. Метод демонстрирует оптимальный маршрут с высокой скоростью и малыми затратами объемов памяти. «Эвристику» целесообразно применять для больших выборок, что обусловлено их быстроедействием при большом количестве пунктов назначения. Впрочем, АИО в сравнении с МБС представляется менее предпочтительным вариантом в силу более высоких временных и вычислительных затрат. Примечательно, что МБС демонстрирует хороший результат не только на больших выборках, но и на малых, что делает его предпочтительным вариантом на всем интервале точек 3-26 в сравнении с его «оппонентами».

Для внутреннего уровня архитектуры системы управления производством сформулирована многокритериальная задача оптимизации структуры баз данных по двум противоречивым критериям: объему занимаемой памяти и стоимости выполнения типовой нагрузки SQL-запросов. Показано, что выбор степени нормализации/денормализации схемы БД влияет как на показатель V_{data} , так и на модель стоимости запросов.

Разработана информационная модель анализа критериев оценки системы управления производством, основанная на нечетком логическом выводе, с применением пакета Fuzzy Logic Toolbox вычислительной системы MATLAB. Описаны: разработка НЛВ, главного и вспомогательного скриптов, самой модели в Simulink. Проведен опрос пользователей СУ, получены вход-

ные данные для оценки по выделенным критериям. Выделены слабые критерии оценки системы управления производством и даны рекомендации по их усовершенствованию. Обоснована целесообразность применения разработанной модели для оценки СУ.

Применение холонических структур, распределенное мультиагентное и холархические принципы управления в построении информационных архитектур предприятий позволило повысить точность и гибкость управления и качество автоматизации процессов. Благодаря горизонтальному самоподобию особые случаи заказов, продуктов и ресурсов могут обрабатываться аналогично номинальным случаям. Вертикальное самоподобие позволяет избежать необходимости в строгих иерархических уровнях.

Для оценки надежности информационной архитектуры, необходимо представить систему управления производством как совокупность множества элементов, параметры которых являются случайными величинами, распределенные по различным законам. Для нахождения показателей надежности можно использовать вероятностный и статистический методы. Показатели надежности в целом определяются на основе методов теории вероятностей с использованием данных о плотностях потоков отказов, видах и характеристиках функций распределения отказов во времени (в течение наработки). Если элемент СУ является невозстанавливаемым по тем или иным причинам, то основным показателем надежности будет вероятность безотказной работы. Для восстанавливаемых элементов можно дополнительно использовать показатели, характеризующие процесс восстановления такие как: среднее время восстановления, интенсивность восстановления, средняя наработка между отказами. Важным показателем восстанавливаемых элементов считается коэффициент оперативной готовности к исполнению установленных функций в произвольный момент времени. Для определения показателей по таким свойствам надежности как долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость применять соответствующие аналитические или статистические характеристики.

Предложен механизм гибридного подхода к выбору оптимальной конфигурации системы управления машиностроительным производством, основанный на сочетании нечеткой логики и многокритериальной оптимизации по Парето. Разработана каскадная схема оценки каждого автономного элемента на трех уровнях архитектуры (внешний, концептуальный, внутренний) с использованием 11 параметров, часть из которых оценивается четкими критериями, часть – нечеткой логикой. Механизм включает формирование множества всех возможных конфигураций, отбор Парето-оптимальных решений по интегральному показателю (качество, время, длина маршрута, память, надежность) и адаптивное переключение конфигураций в процессе эксплуатации при изменении требований, нагрузки, эргономики или надежности системы. Практическая реализация механизма позволит повысить эффективность СУ машиностроительным производством за счет автоматического выбора наиболее целесообразной комбинации автономных элементов для каждой конкретной ситуации эксплуатации.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ О СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

5.1. Функциональные возможностей аналитической платформы

Успешное управление предприятием базируется на максимально объективном знании о текущем состоянии. Любой анализ, планирование или моделирование начинается со сбора и систематизации статистической информации. Современное предприятие, на сегодняшний день, как правило, обладает высокой степенью автоматизации процессов, и сбор информации, не является проблемой. Задача заключается в правильной обработке для последующего анализа с использованием комплексной системы аналитики, для сбора, хранения, консолидации и наглядной визуализации данных из различных источников [224, 1].

Аналитическая платформа предприятия это и информационные системы, и системы поддержки управленческих решений, и системы работы с заказчиками и поставщиками, и автоматизированные системы управления и учета.

Для дальнейшего исследования выбрано одно из самых перспективных направлений развития, а именно B2E EAIP BI – платформа интеграции разнородных данных на основе бизнес-интеллекта, крупной территориально распределенной организации, для которого в основу данных для анализа возьмем данные из автоматизированной системы контроля защищенности и управления требованиями.

Система контроля защищенности представляет собой централизованную информационную систему, предназначенную для проведения внутреннего аудита (инструментального контроля) защищенности информационно-телекоммуникационной инфраструктуры предприятия на периодической основе в автоматическом режиме [167].

Система контроля защищенности позволяет получить объективную оценку состояния защищенности как всей информационно-телекоммуникационной инфраструктуры предприятия, так и отдельных подразделений, узлов и приложений, в том числе на уровне филиалов в субъектах Российской Федерации [53].

Архитектура аналитической платформы в рассматриваемой системе включает несколько взаимосвязанных уровней [168]: уровень сбора и первичной обработки данных; уровень извлечения, преобразования и загрузки данных; уровень накопления данных; уровень представления данных в витринах; уровень аналитической обработки данных; уровень web-приложения.

1) Сбор и первичная обработка данных

На первом уровне архитектуры расположены источники данных, которые выступают в роли транзакционных баз данных и входят в состав системы анализа защищенности. Эти источники предназначены для регистрации результатов текущей деятельности системы управления производством. К их ключевым характеристикам относятся ориентация на обработку больших потоков событий и обеспечение высокой частоты изменения записей. Совокупность таких транзакционных источников образует нижний, базовый слой архитектуры аналитической платформы.

2) Извлечение, преобразование и загрузка данных

На втором уровне реализуется процесс извлечения, преобразования и загрузки данных (ETL-процесс), поддерживаемый специализированными ETL-инструментами. Этот уровень обеспечивает перенос информации из транзакционных систем в специализированные хранилища, одновременно выполняя ее очистку, приведение к единому формату и согласование структур [84].

3) Накопление данных

Третий уровень архитектуры формируют источники данных, именуемые хранилищами данных. Хранилища предназначены для длительного хранения, консолидации и подготовки информации к аналитической обработке [147]. Хранилище данных, являясь центральным звеном архитектуры аналитической

платформы, выступает интегрированным источником информации для всестороннего анализа, охватывающего все доступные массивы данных [186].

4) Представление информации в витринах данных

Четвертый уровень представлен витринами данных (data marts), ориентированными на решение конкретных аналитических задач и проведение целевого делового анализа [241, 165]. Использование витрин данных, как многомерных, так и реляционных, в сочетании с современными средствами бизнес-аналитики позволяет трансформировать исходные данные в структурированную информационную базу, пригодную для оперативного и стратегического принятия управленческих решений.

5) Анализ данных

На следующем уровне располагаются программные средства делового анализа, или инструменты бизнес-интеллекта (Business Intelligence Tools, BI-инструменты). Они обеспечивают руководящие звенья организации широким набором возможностей для комплексного анализа информации, работы с большими объемами данных, построения аналитических отчетов и прогнозов. BI-инструменты способствуют формированию объективных выводов и принятию обоснованных решений, снижая риск ошибочного выбора до приемлемого уровня [63, 93].

6) Web-приложение

Завершающий уровень архитектуры представлен web-приложением, которое выступает интерфейсом доступа к аналитическим возможностям платформы. Использование стандартного web-браузера в качестве клиента дает возможность уменьшить расходы на приобретение, установку и сопровождение настольных аналитических программных средств для многочисленных рабочих мест пользователей.

При входе на аналитическую платформу пользователь попадает на главную страницу, где пользователю доступны следующие разделы: главная стра-

ница; индикаторы; контроль защищенности; контроль эффективности; управление активами; соответствие стандартам; распространение уязвимостей; статистика сканирования.

На главной странице отображаются показатели информационной безопасности по всей инфраструктуре в целом с возможностью детализации по подразделениям (рисунок 57). Все показатели логически разбиты на четыре группы: контроль защищенности; контроль эффективности; управление активами; соответствие стандартам.

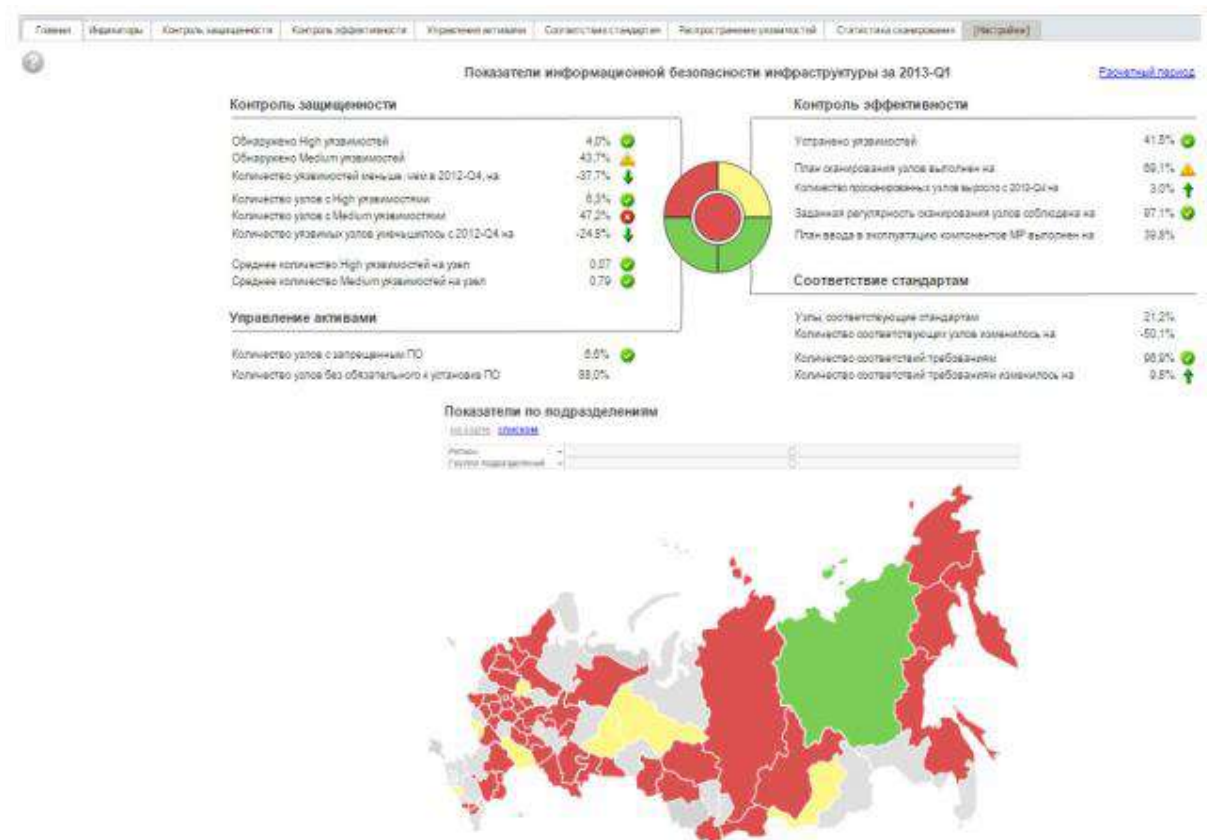


Рисунок 57 - Главная страница платформы

Возможность выбора расчетного периода позволяет получить информацию по всем текущим и прошлым показателям, в том числе для ретроспективного анализа и анализа динамики за прошлые периоды.

Детализация показателей, представленная в режиме таблицы, отображает все региональные и организационные подразделения в виде иерархии со статусами по каждой группе показателей (рисунок 58).

В разделе «контроль защищенности» отображаются данные по обнаруженным уязвимостям инфраструктуры за выбранный расчетный период и динамика их изменения. Основные показатели (рисунок 59):

- круговые диаграммы отображают распределение уязвимостей разного уровня и узлов с максимальным уровнем уязвимости;
- данные по интегральной уязвимости инфраструктуры, а также средней интегральной уязвимости узла (от числа просканированных узлов);
- среднее количество уязвимости на узел (от числа просканированных узлов), а также отдельно среднее количество high/medium-уязвимостей;
- графики изменения количества обнаруженных уязвимостей и уязвимых узлов по оси времени;
- графики изменения синтетических показателей: интегральной уязвимости инфраструктуры (с возможностью переключения на среднее значение на узел) и среднего количества уязвимости на узел (с возможностью выбора среднего по уровню high/medium/low).

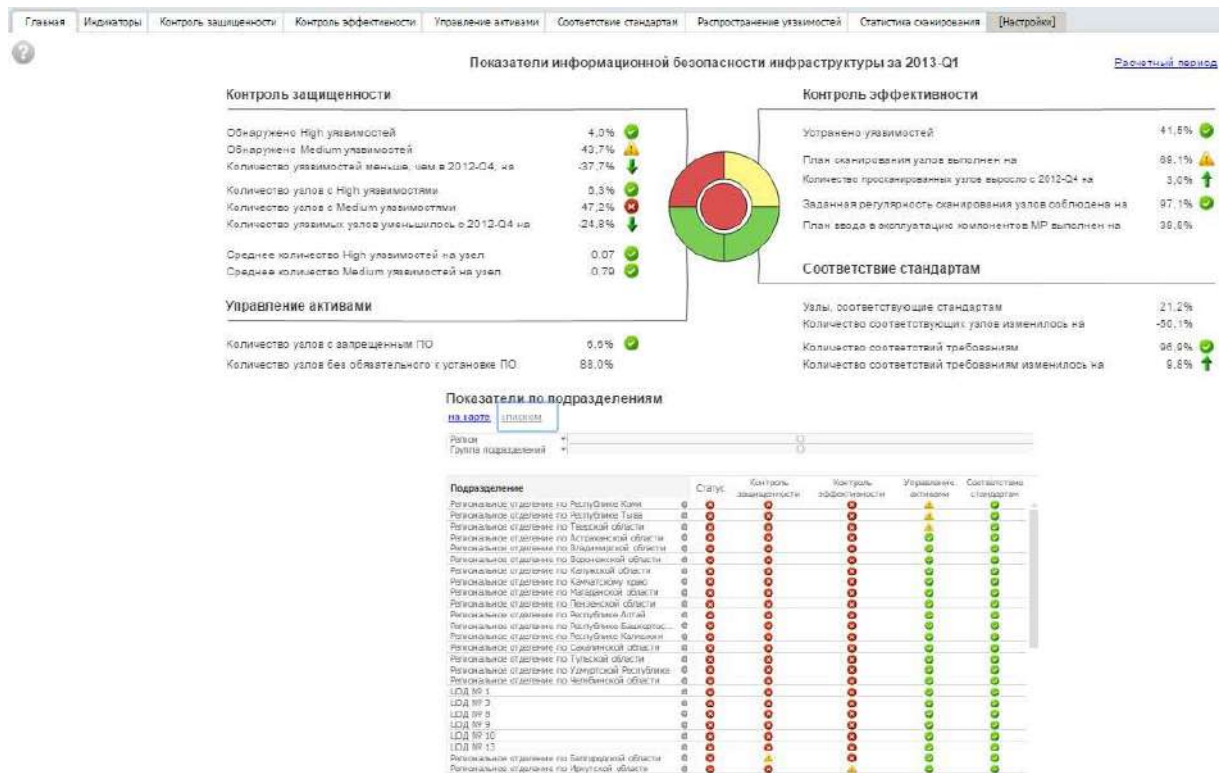


Рисунок 58 - Табличное отображение группы подразделений со статусами

Задачи, решаемые с помощью раздела «Контроль защищенности»: детализация показателей по подразделениям; решение задачи data discovery; динамика распространение уязвимостей по инфраструктуре; поиск и фильтрация распространенных уязвимостей.

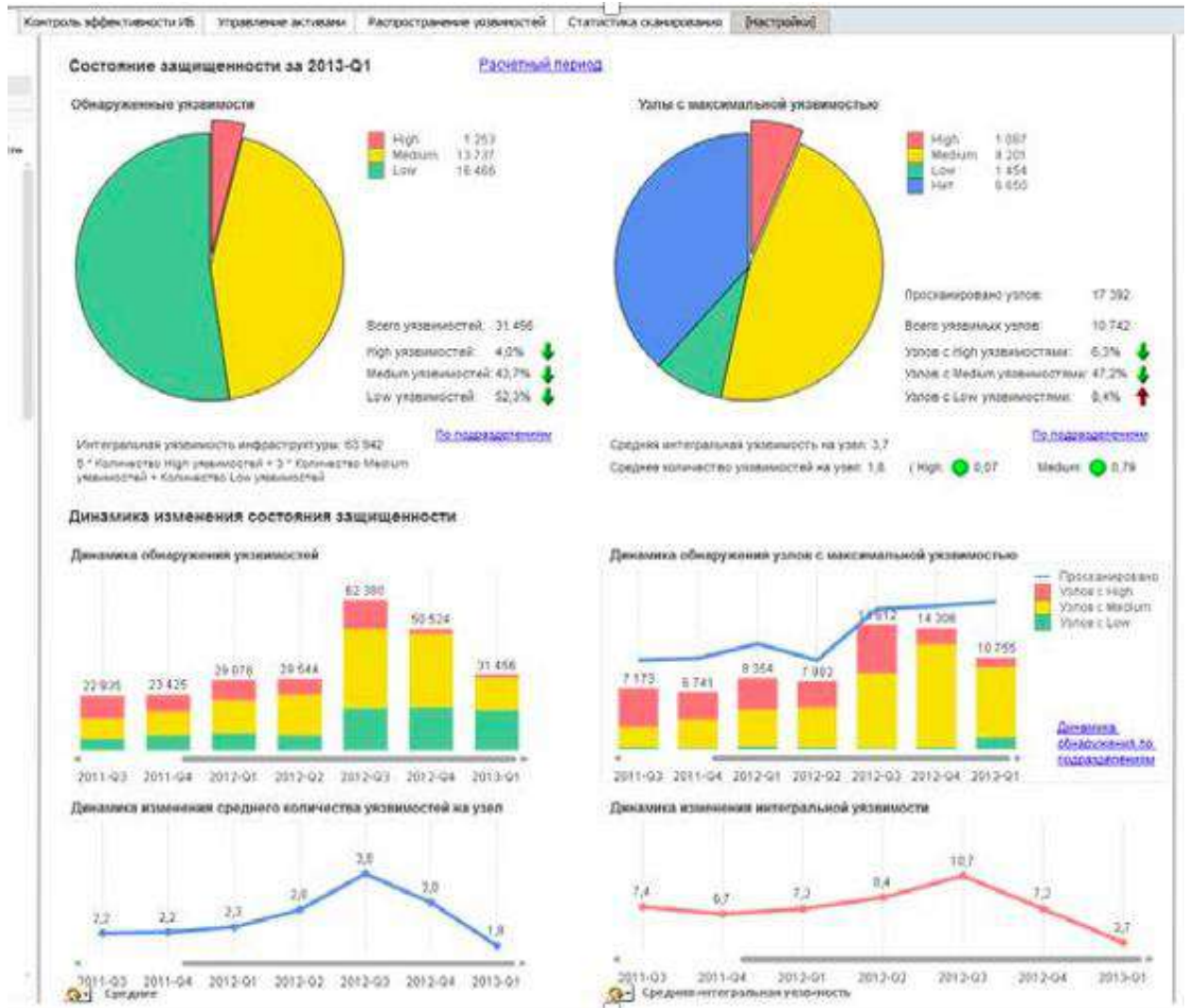


Рисунок 59 – Пример раздела «Контроль защищенности»

Раздел «Контроль эффективности» предоставляет информацию по следующим ключевым показателям (рисунок 60): выполнение заданного плана сканирования инфраструктуры; выполнение заданного плана ввода в эксплуатацию компонентов системы анализа защищенности; количество устраненных уязвимостей; соблюдение заданной регулярности сканирования.

В таблице представлены данные по каждому региону (с возможностью перехода до уровня подразделений): количество просканированных узлов в те-

кущем расчетном периоде; динамика изменения количества просканированных узлов по сравнению с прошлым периодом; плановые значения; процент выполнения плана (с графическим представлением); дата последнего известного сканирования в этом регионе.

В разделе «Управление активами» представлена информация по инвентаризации и контролю установленного программного обеспечения (по «чернобылым» спискам) (рисунок 61). Для контроля, установленного ПО используются 3 вида списков: обязательное к установке (антивирусы, программы удаленного доступа и т.п.); запрещенное ПО (нештатные мессенджеры, устаревшие версии рабочего ПО, игровые серверы и т.п.); поддерживаемое ПО – программное обеспечение, разрешенное для установки IT-отделом.



Рисунок 60 – Пример раздела «Контроль эффективности»

Раздел отображает информацию по узлам, соответствующим стандартам, а также количество и динамику соответствий требованиям (рисунок 62).

На странице представлены следующие данные: узлы, соответствующие стандартам; количество соответствий требованиям; динамика узлов, соответствующих стандарту; динамика соответствий стандарту; самые соответствующие узлы; описание требования.



Рисунок 61 – Пример раздела «Управление активами»

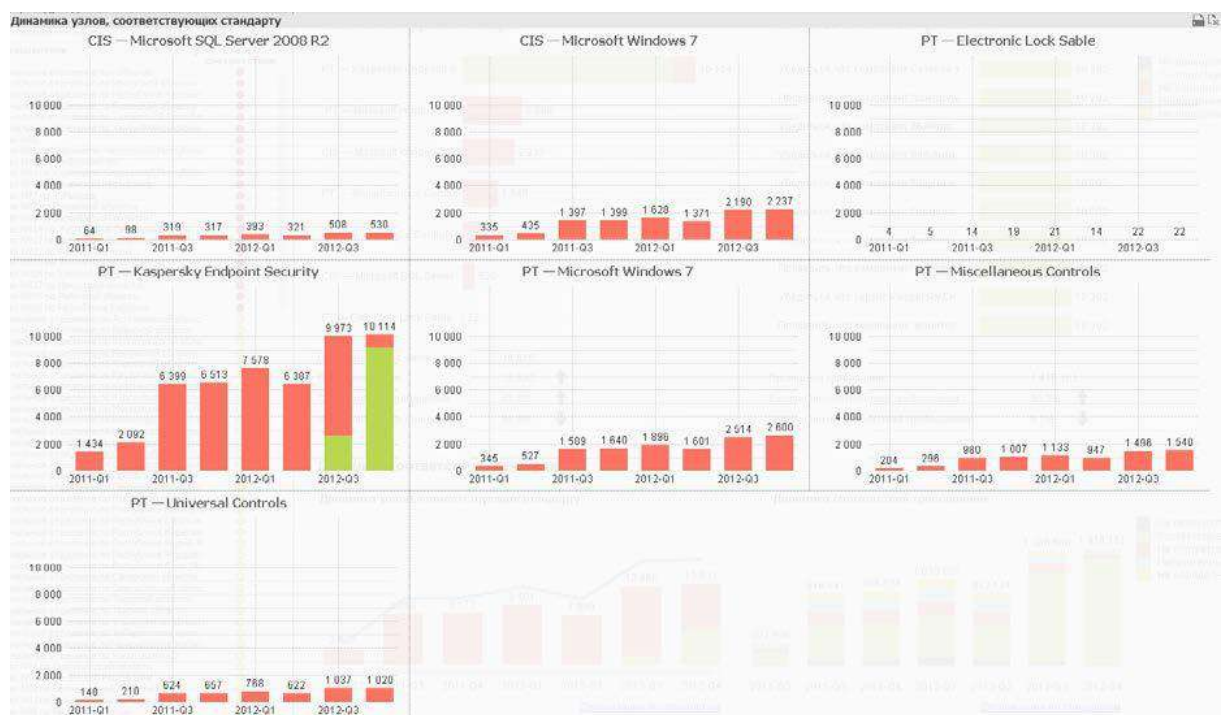


Рисунок 62 – Пример раздела «Соответствие стандартам»

Раздел «Статистика сканирования» отображает ход сканирования в текущем расчетном периоде (рисунок 63). На странице расположена следующая информация:

- текущий показатель выполнения плана сканирования и сравнение с показателем предыдущего периода;
- текущий показатель соблюдения регулярности сканирования;
- подразделения, выполнившие план сканирования;
- подразделения, не проводящие сканирование (или не приславшие данные на консолидацию);
- статистика использования серверов и сканеров;
- выполненные задачи сканирования;
- текущие версии и лицензии компонентов;
- даты последнего сканирования и результаты работы каждой задачи/сканера/сервера и использующих их подразделений.

Данные для этого раздела могут обновляться в течение текущего периода с любой частотой (вплоть до одного часа) и никак не влияют на расчетные метрики и параметры эффективности прошлых периодов. При наступлении следующего расчетного периода собранные данные автоматически формируют полноценные метрики, и расчетные статусы отображаются в остальных разделах платформы.

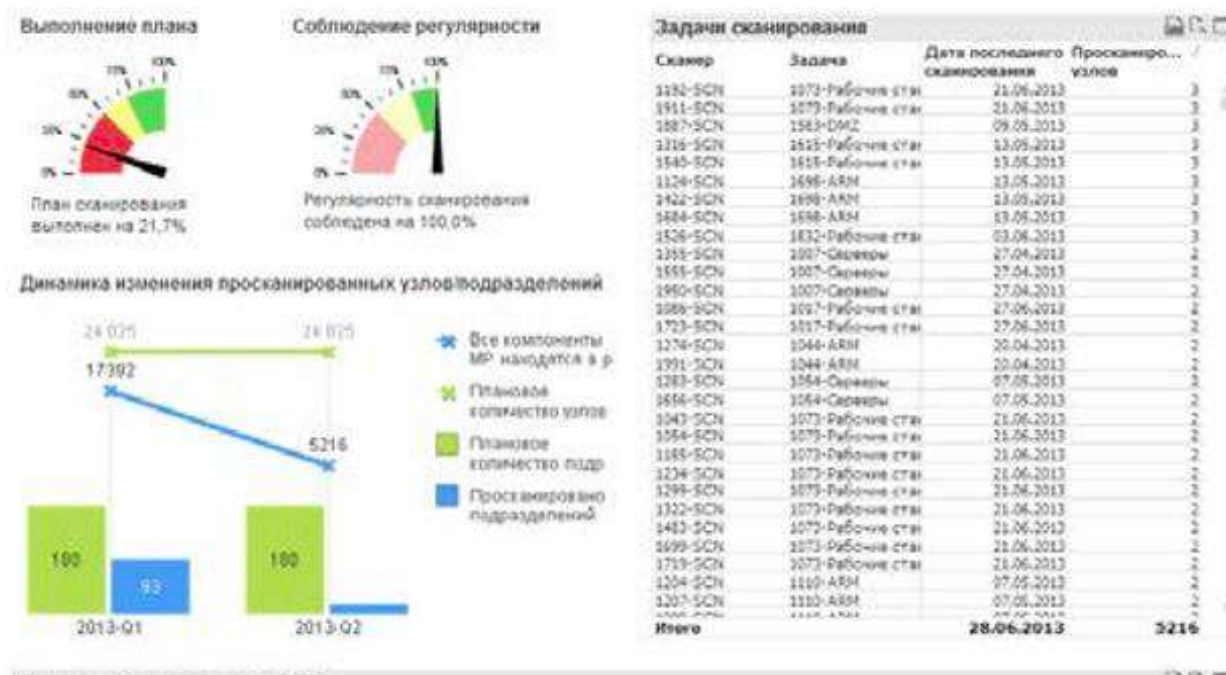


Рисунок 63 - Раздел «Статистика сканирования»

5.2. Анализ данных о показателях архитектуры системы управления в режиме реального времени

Отмечают ряд характерных рисков, связанных с анализом больших объемов данных:

- необходимость увеличения затрат на анализ данных вследствие отсутствия их стандартизации;
- замедление формирования и обработки потока данных;
- киберугрозы для информационных систем, риски утраты либо утечки конфиденциальной и секретной информации [150].

Подчеркивается, что значительная часть недостатков в области правового регулирования использования больших данных обусловлена недостаточной комплексной проработкой проблемы одновременно в экономическом и юридическом аспектах. В этой связи отечественные исследования целесообразно условно классифицировать по группам проблем и потенциальных угроз: технологическим, человеческим и юридическим. При анализе различных видов угроз и сложностей, возникающих при использовании больших данных в процессе принятия решений, обращается внимание и на разные подходы к пониманию самих данных в зависимости от характера содержащейся в них информации [90, 42, 72].

Интеллектуальный анализ данных рассматривается как процесс обнаружения пригодных к использованию, практически значимых сведений в крупных массивах данных [69, 74]. В его основе лежит применение математических методов и моделей для выявления закономерностей и тенденций, присущих данным. Как правило, такие зависимости не поддаются выявлению при традиционном визуальном просмотре, поскольку либо слишком сложны, либо скрыты в чрезмерно больших объемах информации [6, 110, 96].

Выделенные закономерности и тренды могут быть формализованы в виде модели интеллектуального анализа данных. Такие модели используются в различных прикладных сценариях, в частности [157, 2, 187]:

- **прогнозирование:** оценка объемов продаж, прогнозирование нагрузки на сервер или времени его простоя;
- **расчет рисков и вероятностей:** выбор наиболее перспективных заказчиков для целевой рассылки, определение точки равновесия для рискованных сценариев, назначение вероятностей диагнозам или другим исходам;
- **формирование рекомендаций:** выявление продуктов, которые с высокой вероятностью приобретаются совместно, построение рекомендательных списков;
- **поиск последовательностей:** анализ последовательности действий заказчиков в процессе покупки, прогнозирование вероятного следующего события;
- **группирование (кластеризация):** разделение заказчиков или событий на кластеры взаимосвязанных элементов, выявление и прогнозирование общих характеристик.

Процесс интеллектуального анализа данных носит циклический, итерационный характер: создание аналитической модели данных является динамическим и многократно повторяющимся процессом. На этапе изучения и моделирования данных может выясниться, что имеющейся информации недостаточно для построения требуемых моделей, что приводит к необходимости расширения исходного набора данных. Для получения качественной модели часто требуется неоднократное повторение всех шагов процесса [208].

Визуализация данных – это графическое представление информации и аналитики: графики, диаграммы, карты, дашборды. Этот инструмент приводит огромное количество информации в порядок, помогает быстрее понимать ее, подчеркивает тренды [75, 158, 189, 285]. В настоящий момент используют более 60 способов визуализации данных: различные виды диаграмм, графиков, дашборды и карты [304, 44, 248, 203].

В контроле защищенности основное понятия, с которыми предстоит работать это – уязвимости [295]. Уязвимость используется для обозначения недостатка в системе управления производством, используя который, можно намеренно нарушить ее целостность и вызвать неправильную работу.

Метод расчета показателей контроля эффективности предоставляет информацию по следующим ключевым показателям: выполнение заданного плана сканирования и плана ввода в эксплуатацию элементов системы управления производством; количество устраненных уязвимостей; соблюдение заданной регулярности сканирования.

В разделе управление активами представлена информация по инвентаризации информационных активов и контролю установленного программного обеспечения (по «черно-белым» спискам). Для контроля установленного программного обеспечения используются 3 вида списков:

1. обязательное к установке программное обеспечение (антивирусы, программы удаленного доступа и т.п.);
2. запрещенное программное обеспечение (нештатные мессенджеры, устаревшие версии рабочего ПО, игровые серверы и т.п.);
3. поддерживаемое программное обеспечение – программное обеспечение, разрешенное для установки.

Метод расчета показателей соответствия стандартам отображает информацию по узлам, соответствующим стандартам, а также количество и динамику соответствий требованиям. В разделе представлены следующие данные: узлы, соответствующие стандартам; количество соответствий требованиям; динамика узлов, соответствующих стандарту; динамика соответствий стандарту; самые соответствующие узлы; описание требования.

Статистика сканирования отображает ход сканирования в текущем расчетном периоде. На странице расположена следующая информация:

- текущий показатель выполнения плана сканирования и сравнение с показателем предыдущего периода;
- текущий показатель соблюдения регулярности сканирования;

- подразделения, выполнившие план сканирования;
- подразделения, не проводящие сканирование (или не приславшие данные на консолидацию);
- статистика использования серверов и сканеров системы анализа защищенности;
- выполненные задачи сканирования;
- текущие версии и лицензии компонентов системы анализа защищенности;
- даты последнего сканирования и результаты работы каждой задачи/сканера/сервера и использующих их подразделений.

Данные для этого раздела могут обновляться в течение текущего периода с любой частотой (вплоть до одного часа) и никак не влияют на расчетные метрики и параметры эффективности прошлых периодов.

Рассмотрены общие вопросы проблематики анализа больших объемов данных, а также общие вопросы визуализации данных. В работе принято решение с помощью платформы, в котором применяются технологии бизнес интеллекта для анализа больших объемов информации, и с применением методов визуального отображения данных, проверить влияние двадцати расчетных показателей на скорость и качество управленческих решений.

Основное целью функционирования системы анализа защищенности является своевременность выявления и устранения уязвимостей. В больших информационных инфраструктурах, территориально распределенных системах, высоконагруженных системах, данная задача становится трудновыполнимой, в силу как объективных, так и субъективных причин, основу которым составляет человеческий фактор.

В данной работе в качестве примера предлагается определить следующие управленческие задачи системы: задача исследования исходных данных; инвентаризация информационных активов; динамика распространения уязвимостей; контроль эффективности; соответствие стандартам.

Задача исследования исходных данных, в вопросе функционирования системы управления производством, является ключевой, именно от качественного и своевременного решения данной задачи зависит время, в которое будут найдены и устранены самые критические уязвимости в информационной архитектуре.

Задача инвентаризация информационных активов является очень важной с точки зрения управления информационными активами предприятия, так как может являться источником разнородных данных о цифровом имуществе для предприятия и смежных подразделений.

Динамика распространения уязвимостей по инфраструктуре позволяет оценить качество работы по устранению уязвимостей профильными подразделениями, а также контроль работы сторонних систем управления производством.

Показатели группы контроля способствуют определению эффективности либо не эффективности работы системы анализа защищенности, в таких вопросах как, полнота сканирования и регулярность сканирования. Данная группа контролей применяется при анализе инфраструктуры на соответствия требованиям стандартов. Стандарты могут быть как международными, отраслевыми либо внутренними корпоративными стандартами.

Для решения определенных управленческих задач было проведено несколько экспериментов, по числу решаемых задач. Суть эксперимента состоит в том, чтобы одну и ту же управленческую задачу постараться решить двумя способами.

В первом способе данные для решения поставленных управленческих задач были подготовлены с помощью штатных средств конструктора отчетов системы анализа защищенности и проанализированы для выработки управленческого решения. Во втором случае развернута платформа, в который были автоматически интегрированы данные из системы анализа защищенности.

Каждый эксперимент проводился двумя способами в 5 итераций, с увеличением числа обрабатываемых данных по количеству филиалов организации. Размер анализируемой информационной инфраструктуры в каждом филиале равен 1000 сетевых элементов.

Пример решения задачи исследования исходных данных: выбраны данные по одному из регионов, например, по Алтайскому краю – обнаружено 1449 уязвимых узлов с 3643 уязвимостями (рисунок 64).



Рисунок 64 - Пример решения задачи Data Discovery

Выбирается одна из наиболее распространенных High-уязвимостей, например, «Найден пароль» – из рисунка 109 видно, что подобрано 135 учетных записей для служб «VNC Remote Desktop», «Radmin» и «Telnet» (рисунок 65).

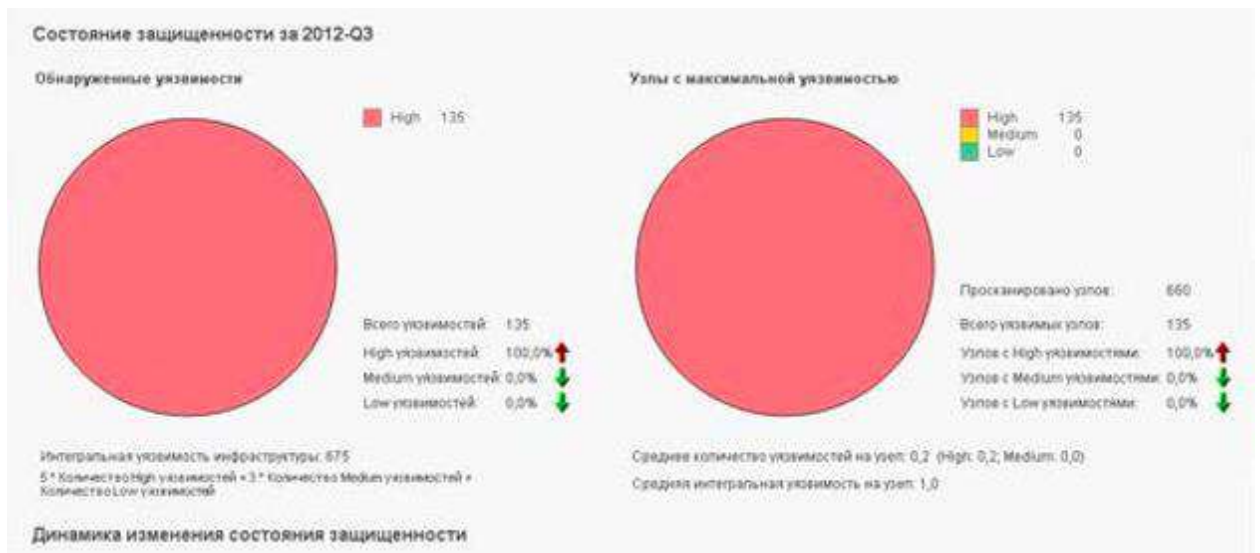


Рисунок 65 - Выбор уязвимости

Детализировав по подразделениям, можно получить информацию, о том в каком подразделении сколько учетных записей подобрано (либо сколько узлов подвержено данной уязвимости).

Таким образом поставленная задача решена исследования исходных данных в рамках нашего эксперимента решена, что подтверждает правильность применяемого подхода и выбора расчетных показателей.

Пример решения задачи инвентаризации информационных активов: в разделе управление активами представлена информация по инвентаризации и контролю установленного программного обеспечения (по «черно-белым» спискам) (рисунок 66). Все остальное обнаруженное ПО подлежит исследованию на предмет включения в списки запрещенного или поддерживаемого.

В верхней части страницы показано распределение обнаруженного программного обеспечения по категориям и динамика его обнаружения. Пример представлен на рисунке 67. На нем видно, что доля запрещенного ПО составляет всего 1%, но динамика его обнаружения растет, что может означать необходимость принятия соответствующих мер. В то же время, количество обязательного к установке ПО тоже растет, что демонстрирует положительную динамику соблюдения политики безопасности.

Таким образом поставленная задача инвентаризации информационных активов в рамках нашего эксперимента решена, что подтверждает правильность применяемого подхода и выбора расчетных показателей. Пример решения задачи изучения динамики распространения уязвимостей: сводная статистика всех показателей динамики распространения уязвимостей по всей информационной инфраструктуре (рисунок 68).

Таблица Обнаруженные уязвимости содержит список самых распространенных уязвимостей и отображает следующую дополнительную информацию:

1. Идентификатор уязвимости в терминах;
2. Оценка CVSS;
3. Текущий статус уязвимости: выявлена, актуальна, устранена (с возможностью поиска по столбцу);
4. Время первого обнаружения: больше года, меньше года, меньше полу-года, меньше квартала, меньше месяца;
5. Количество подверженных уязвимости регионов с динамикой изменения с прошлого расчетного периода (в скобках указано абсолютное значение, стрелкой показана динамика: рост/падение);
6. Количество подразделений;
7. Количество уязвимых узлов с динамикой изменения;
8. График распространения по количеству уязвимых узлов за все время сканирования (красным и зеленым отмечены точки наибольших и наименьших значений);
9. Список идентификаторов уязвимости по общедоступным базам уязвимостей (указаны через запятую).

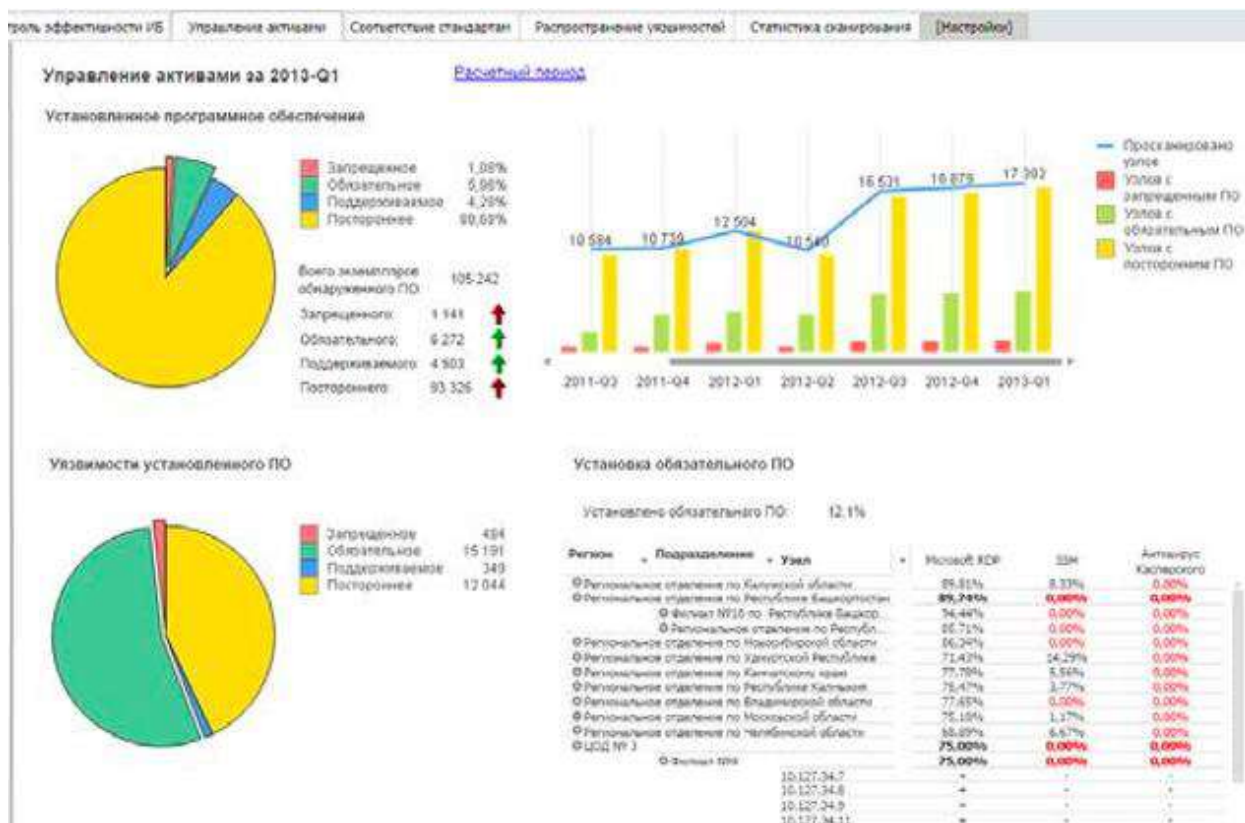


Рисунок 66 - Управление активами

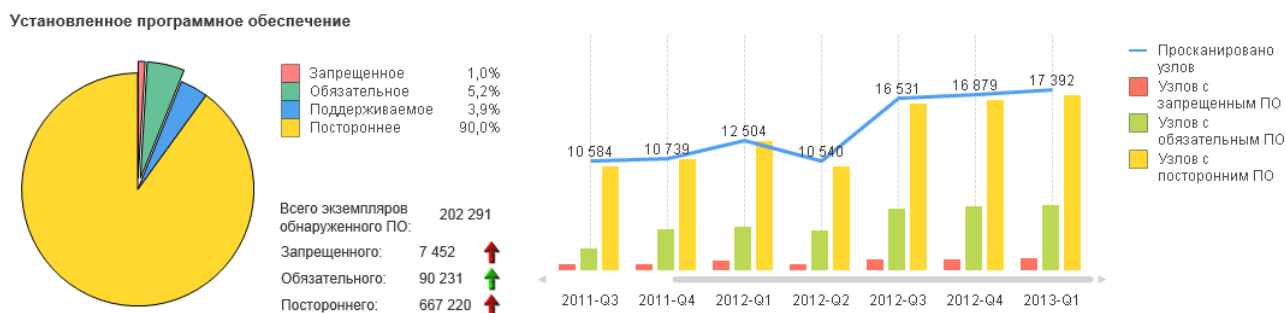


Рисунок 67 - Распределение обнаруженного программного обеспечения по категориям

Отфильтровав определенный набор уязвимостей, можно посмотреть динамику их распространения по количеству уязвимых узлов, количеству уязвимостей, а также количество устраненных уязвимостей (рисунок 69).

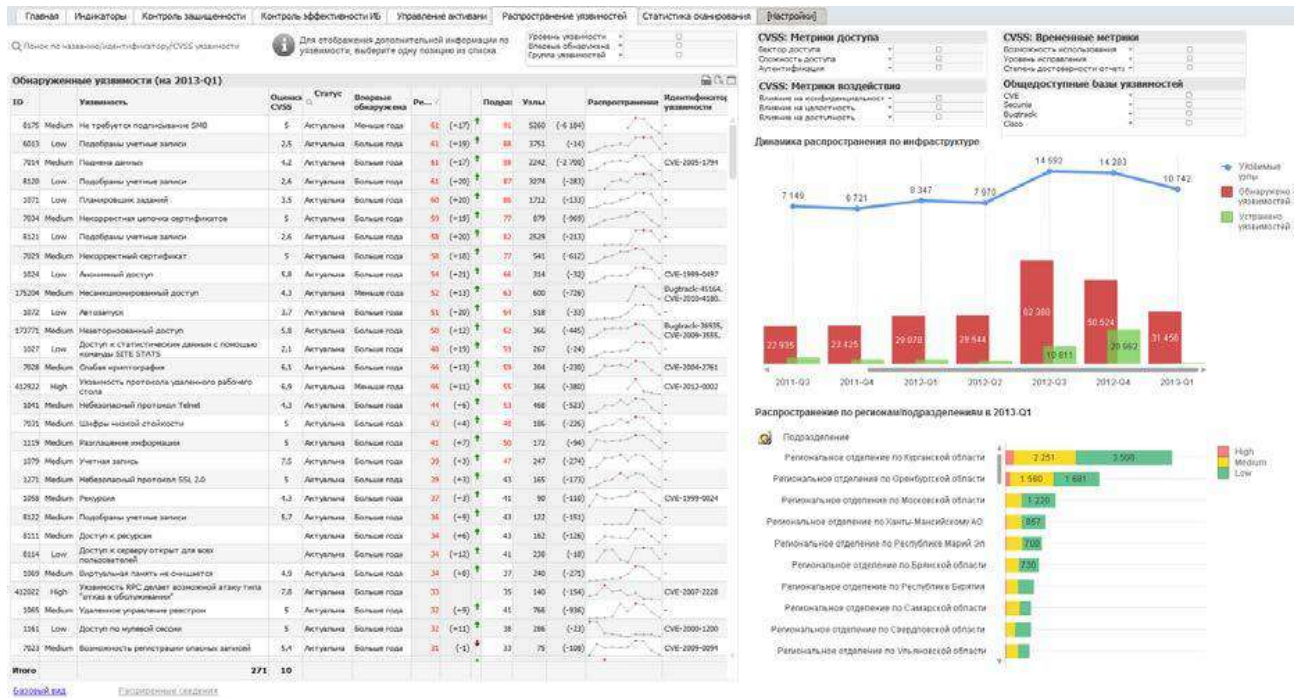


Рисунок 68 - Распространение уязвимостей

Распространение по регионам/подразделениям также можно увидеть на графике (рисунок 70).

Таким образом поставленная задача исследования динамики распространения уязвимостей в рамках нашего эксперимента решена, что подтверждает правильность применяемого подхода и выбора расчетных показателей.

Пример решения задачи контроля эффективности: данная задача представляет информацию по следующим ключевым показателям (рисунок 71): выполнение заданного плана сканирования и плана ввода в эксплуатацию компонентов системы; количество устраненных уязвимостей; соблюдение заданной регулярности сканирования.

Динамика распространение по инфраструктуре



Рисунок 69 - Динамика распространения по инфраструктуре

Распространение по регионам/подразделениям в 2013-Q2



Рисунок 70 - Распространение по регионам/подразделениям

На графике представлена динамика изменения фактических значений количества просканированных узлов и подразделений и их отношение к плановым значениям. В таблице представлены данные по каждому региону (с возможностью перехода до уровня подразделений): количество просканированных узлов в текущем периоде; динамика изменения количества просканиро-

ванных узлов по сравнению с прошлым периодом; плановые значения; процент выполнения плана; дата последнего известного сканирования в этом регионе.

Контроль соблюдения регулярности сканирования осуществляется по параметру «Заданная регулярность сканирования», задаваемому пользователем в разделе В таблице представлены следующие данные по каждому подразделению (рисунок 72): соблюдение регулярности сканирования – количество узлов, которые были просканированы с учетом заданной регулярности от общего числа просканированных узлов; средняя частота сканирования – среднее значение по всем расчетным периодам.



Рисунок 71 – Пример вкладки «Контроль эффективности»



Рисунок 72 - Соблюдение регулярности сканирования

При анализе этих данных следует обратить внимание на подразделения с большой средней частотой сканирования и низким процентом соблюдения регулярности.

Список устраненных уязвимостей содержит следующую информацию (рисунок 73): количество устраненных в предыдущем расчетном периоде уязвимостей; процентное отношение к количеству обнаруженных в прошлом расчетном периоде уязвимостей. Уязвимости, полностью устраненные в прошлом расчетном периоде, отмечены зеленым индикатором; количество оставшихся уязвимостей (обнаруженных в новом расчетном периоде).

Пример решения задачи соответствия стандартам: раздел отображает информацию по узлам, соответствующим стандартам, а также количество и динамику соответствий требованиям (рисунок 74). На странице представлены следующие данные: узлы, соответствующие стандартам; количество соответствий требованиям; динамика узлов, соответствующих стандарту; динамика соответствий стандарту; самые соответствующие узлы; описание требования.

В разделе «динамика соответствия стандартам» можно перейти по ссылке «детализация по стандартам», чтобы получить более полные данные по динамике узлов, соответствующих стандартам (рисунок 75).

Таким образом задача контроля соответствия требованиям данных в рамках нашего эксперимента решена, что подтверждает правильность применяемого подхода и выбора расчетных показателей.

Эксперименты с анализом данных проводились в 5 этапов, каждый этап состоял из попарного сравнения полученных результатов. В ходе каждого этапа измерялось время, требуемое на решение задачи ручным методом и автоматизированным методом. Полученные результаты экспериментов представлены в таблице 14.

Из таблицы 14 заметна зависимость роста времени анализа информации как ручным способом, так и автоматизированным, в зависимости от количества информации (филиалов). Также очевидна разница в затраченном времени на решение одной и той же задачи ручным и автоматизированным способом. Данная разница наглядно продемонстрирована на графиках попарных сравнений ручного и автоматизированного анализа по всем решаемым задачам.

Графики сравнений времени решения всех задач в ручном и автоматизированном режиме (рисунки 76 - 77) наглядно демонстрируют, что существенный рост времени анализа наблюдается лишь с увеличением количества филиалов (таблица 15).

Устраненные уязвимости

Устранено 1 882 уязвимости из 29 553 обнаруженных.  6,4%

[Перейти к подробной информации по выбранной уязвимости](#)

Уровень	Уязвимость	Устранено уязвимостей	✓ Устранено на узлах	Осталось уязвимостей	Присутствует на узлах	
Medium	Отложенное межсайтовое выполнение сценариев	3 из 3 (100%)	✓	1	3	1
Low	Разглашение информации	3 из 3 (100%)	✓	3		
High	Отказ в обслуживании	2 из 2 (100%)	✓	2		
High	Переполнение буфера	1 из 1 (100%)	✓	1	20	20
High	Отказ в обслуживании	1 из 1 (100%)	✓	1		
High	Отказ в обслуживании	1 из 1 (100%)	✓	1		
High	Уязвимость протокола удаленного рабочего стола	224 из 1 447 (15%)		224	3 870	3 870
Medium	Удаленное управление реестром	152 из 870 (17%)		152	1 951	1 951
High	Уязвимость RPC делает возможной атаку типа "отказ в обслуживании"	141 из 972 (15%)		141	1 533	1 533
Low	Полубланы учетные записи	125 из 1 806 (7%)		122	6 838	3 882
		1 882 из 29 553 (6%)		964	65 442	17 645

Рисунок 73 - Выполнение плана устранения уязвимостей



Рисунок 74 – Соответствие стандартам

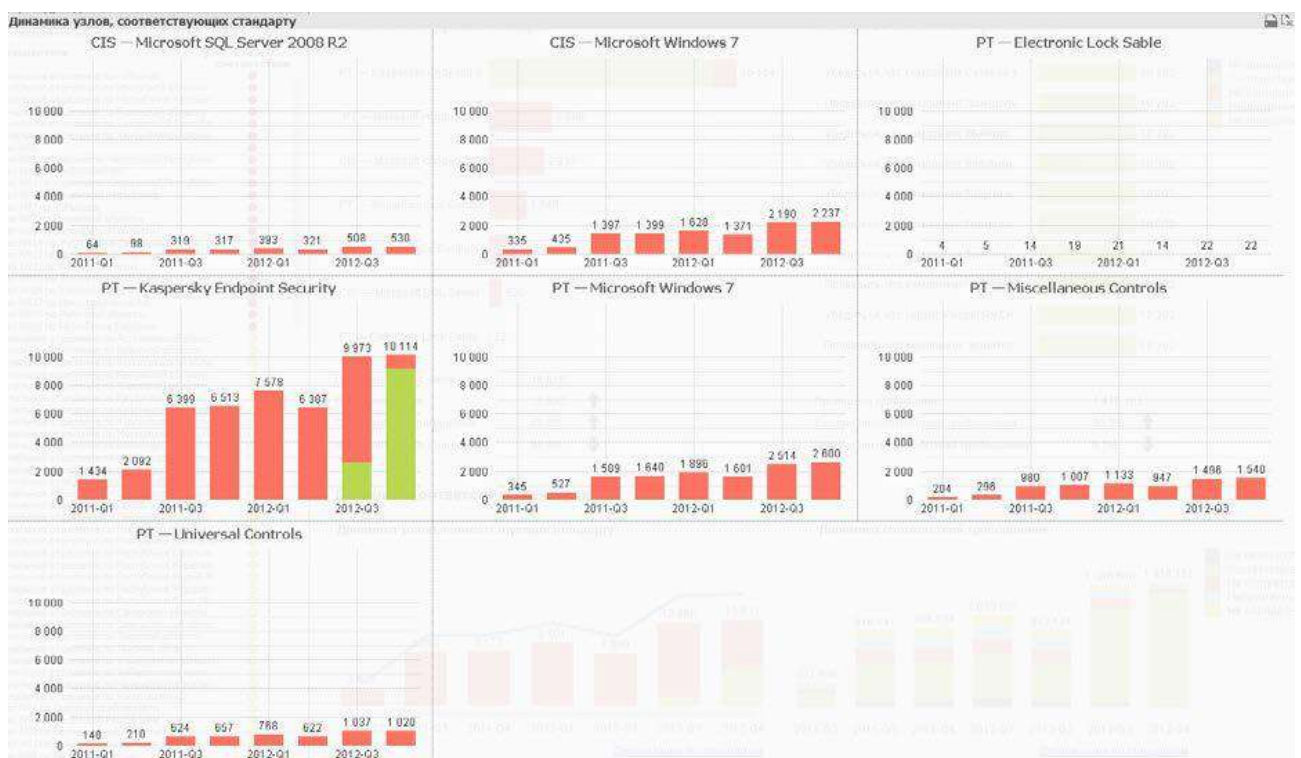


Рисунок 75 - Динамика узлов, соответствующих стандарту

Таблица 14 – Результаты экспериментов

Вид анализа	Наименование решаемой задачи				
	Исследование исходных данных (мин.)	Инвентаризация информационных активов (мин.)	Динамика распространения уязвимостей (мин.)	Контроль эффективности (мин.)	Соответствие стандартам (мин.)
Ручной, на примере 1 филиала	5	15	15	5	7
Автоматизированный, на примере 1 филиала	2	5	4	2	3
Ручной на примере 5 филиалов	15	60	50	15	20
Автоматизированный на примере 5 филиалов	3	6	7	3	5
Ручной на примере 10 филиалов	30	120	100	25	40
Автоматизированный на примере 10 филиалов	3	7	7	3	5
Ручной на примере 20 филиалов	50	180	150	40	55
Автоматизированный на примере 20 филиалов	5	8	8	5	7
Ручной на примере 50 филиалов	90	420	240	70	80

Вид анализа	Наименование решаемой задачи				
	Исследование исходных данных (мин.)	Инвентаризация информационных активов (мин.)	Динамика распространения уязвимостей (мин.)	Контроль эффективности (мин.)	Соответствие стандартам (мин.)
Автоматизированный на примере 50 филиалов	7	12	10	8	10

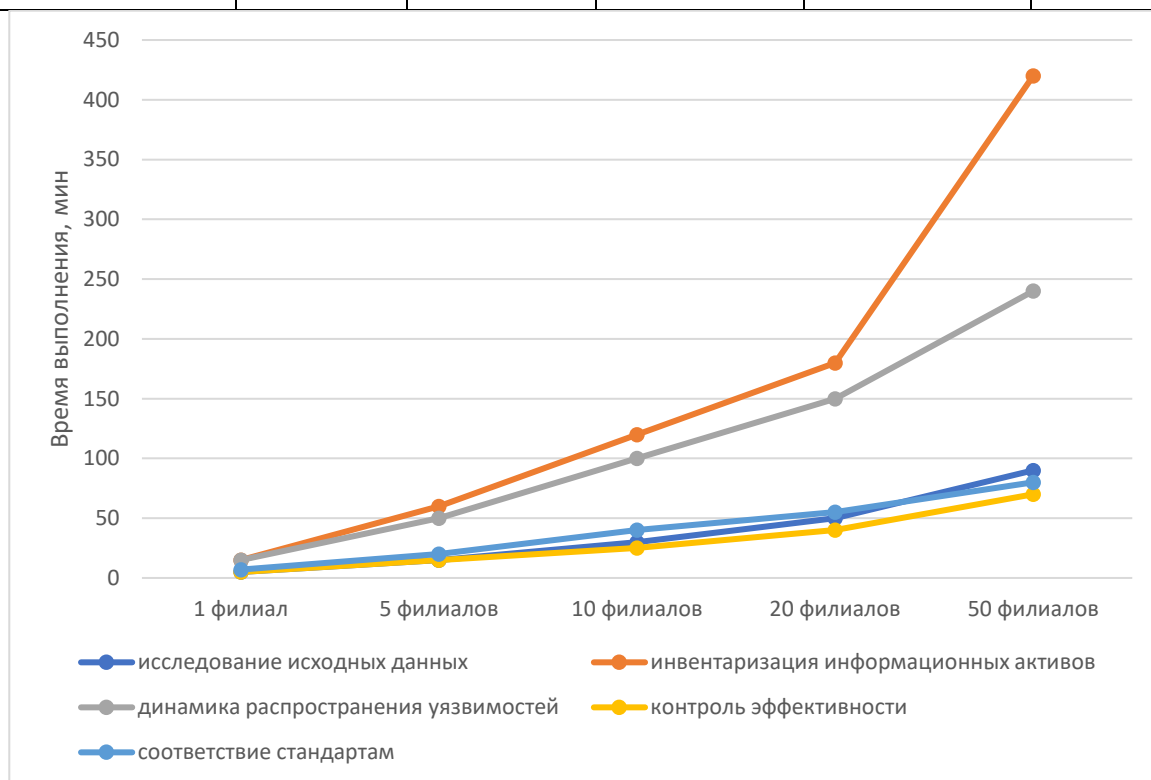


Рисунок 76 - Ручной анализ информации по всем решаемым задачам

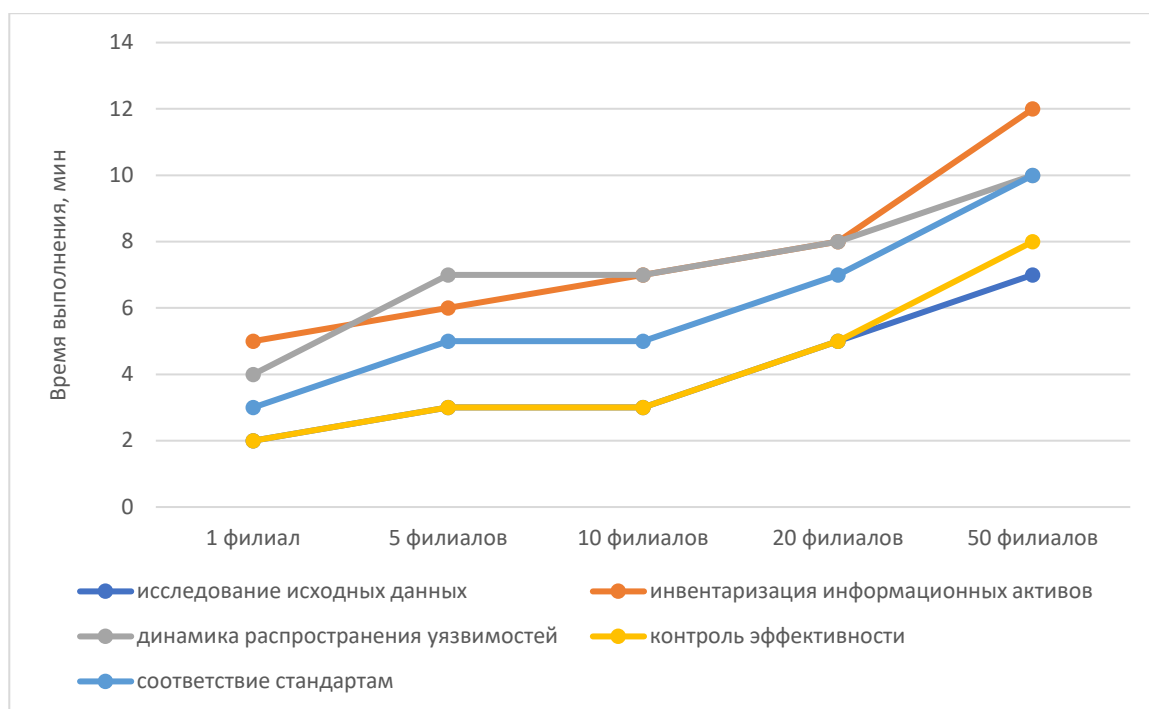


Рисунок 77 - Автоматизированный анализ информации по всем решаемым задачам

Таблица 15 - Соотношение результатов эксперимента

	Иссле- дование исход- ных дан- ных	Инвен- тариза- ция ин- форма- цион- ных ак- тивов	Дина- мика распро- стране- ния уяз- вимо- стей	Кон- троль эффек- тивно- сти	Соот- вет- ствие стан- дартам	Среднее значение по всем за- дачам
	Соотношение ручной/автоматизированный метод анализа					
1 филиал	2,5	3	3,75	2,5	2,33	2,81
5 филиа- лов	5	10	7,14	5	4	6,22
10 фили- алов	10	17,14	14,28	8,33	8	11,55
20 фили- алов	10	22,5	18,75	8	7,85	13,42
50 фили- алов	12,85	35	24	8,75	8	17,72

Продолжая обработку результатов эксперимента, выведем соотношение затраченного времени на решение задачи ручным и автоматизированным способом, а также выведем среднее значение такого соотношения для всех решаемых задач в градации по количеству филиалов (рисунок 78).

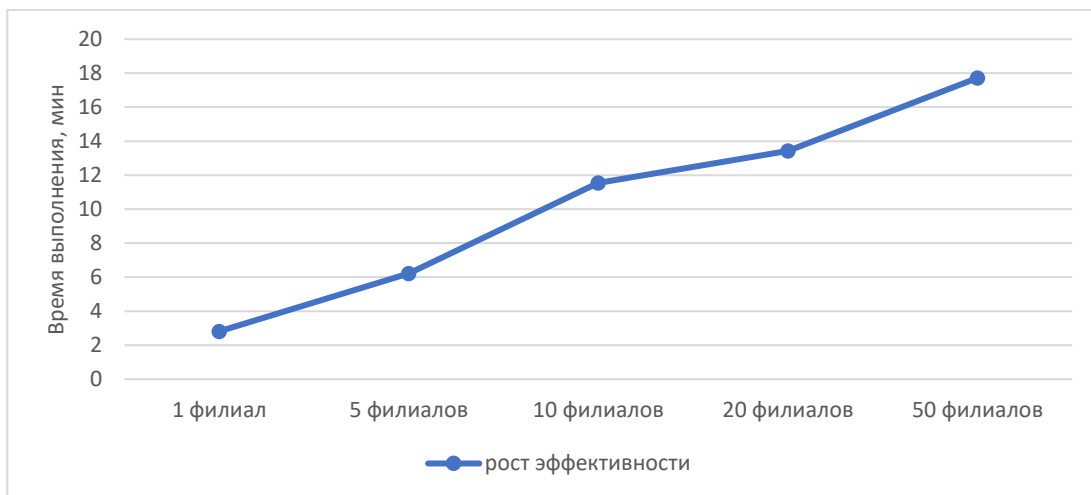


Рисунок 78 - Рост эффективности в зависимости от размера филиальной сети

Исходя из этого можно сделать вывод, что эффективность применения технологий для визуального анализа данных очевидна для любой организации, вне зависимости от ее размера, однако наибольший эффект достигается именно при кратном росте филиальной сети организации.

Исходя из полученных в результате проведения серии экспериментов результатов, можно сделать следующие выводы:

1. перевод результатов сканирования информационной инфраструктуры предприятия в расчетные показатели количественных оценок, с их последующим применением действительно способствует оперативному принятию управленческих решений;
2. данный метод обладает высокой эффективностью именно в организациях с широко развитой филиальной сетью;
3. при применении предлагаемого метода время принятия управленческих решений сокращается от 2,81 до 17,72 раза в отличие от методов ручного анализа, в зависимости от размеров филиальной сети организации.

5.3. Исследование эффективности организации производства в условиях рисков

Функционально модуль включает следующие подкомпоненты:

1. Генератор сценариев рисков – формирует множество сценариев $R = \{r_i\}$, каждый из которых задает значения параметров $\lambda_i, \mu_i, \omega_i, \nu_i$ для определенной комбинации организационно-управленческих, технологических и технических рисков. Сценарии формируются на основе: статистики отказов элементов СУ по филиалам; данных о регулярности сканирования и устранения уязвимостей (раздел «Контроль эффективности»); экспертных оценок вероятности и тяжести реализаций рисков.

2. Калькулятор показателей надежности – для каждой конфигурации архитектуры $a_j \in A$ и сценария $r_j \in R$ решается система уравнений Эрланга и вычисляются показатели $K(a_j, r_j): P_{бр}(t), K_r, T_{м.о.}, P_{оч}$ и другие. При необходимости учитывается человеческий фактор через зависимость $\lambda(S)$.

3. Модуль формирования обобщенного критерия – реализует выбранное правило свертки по сценариям и формирует $K_{об}(a_j)$.

4. Оптимизатор конфигурации – осуществляет поиск $a^* = \operatorname{argmax}_{a_j \in A} K_{об}(a_j)$.
и формирует рекомендации по организации производства (требуемое число обслуживающих ресурсов ω^* , уровень резервирования, требования к μ).

Результаты работы модуля выводятся пользователю через web-интерфейс в виде: таблиц с показателями надежности для различных конфигураций и сценариев; графиков зависимости $K_{об}$ от параметров архитектуры; рекомендаций по изменению состава и структуры обслуживающих ресурсов.

В рамках экспериментального исследования сформировано пять сценариев рисков, охватывающих три группы: организационно-управленческие, технологические и технические. Каждый сценарий описывает определенную комбинацию изменений параметров $\lambda_i, \mu_i, \omega_i, \nu_i$ по сравнению с базовым («номинальным») режимом работы СУ.

- Сценарий r_1 (базовый). Параметры соответствуют средним значениям по статистике эксплуатации. Данный сценарий отражает нормальные условия без существенных отклонений.

- Сценарий r_2 (организационно-управленческие риски). Моделируются задержки согласований и ошибки планирования, что приводит к снижению эффективности восстановления: $\mu = 0,7 \cdot \mu_0$, увеличение времени ожидания в очереди: $v = 0,8 \cdot v_0$, незначительный рост λ за счет ошибок оператора: $\lambda = 1,1 \cdot \lambda_0$.

- Сценарий r_3 (технологические риски). Моделируются вариации технологических процессов и брак, ведущие к росту нагрузки на СУ: $\lambda = 1,3 \cdot \lambda_0$, при этом ресурсы восстановления остаются на базовом уровне: $\mu = \mu_0$, $w = w_0$.

- Сценарий r_4 (технические риски). Моделируются отказы оборудования и сбои ИТ-инфраструктуры: $\lambda = 1,5 \cdot \lambda_0$, $\mu = 0,8 \cdot \mu_0$, сокращение доступных обслуживающих элементов: $w = 0,8 \cdot w_0$.

- Сценарий r_5 (комплексный риск). Комбинированная реализация всех трех групп рисков: $\lambda = 1,4 \cdot \lambda_0$, $\mu = 0,7 \cdot \mu_0$, $w = 0,9 \cdot w_0$, $v = 0,8 \cdot v_0$. Данный сценарий соответствует тяжелым условиям эксплуатации с одновременным действием организационных, технологических и технических факторов.

Для каждого сценария рассмотрены две конфигурации архитектуры СУ:

- a_1 – конфигурация, выбранная по результатам оптимизации без явного учета рисков (на основе номинальных параметров λ_0, μ_0, w_0);
- a_2 – конфигурация, полученная с применением метода (оптимизация по обобщенному критерию $K_{об}$ сценариев $r_1 \div r_5$).

Результаты экспериментов

Для каждой пары (a_j, r_i) рассчитаны ключевые показатели надежности: стационарный коэффициент готовности K_r , вероятность безотказной работы $P_{бр}(t)$ на интервале $t = T_{план}$ (соответствует плановому периоду работы СУ), средняя наработка между отказами $T_{м.о.}$ и вероятность образования очереди $P_{оч}$. В качестве обобщенного критерия использован минимаксный подход:

$$K_{об}(a_j) = \min_i K_r(a_j, r_i).$$

Анализ полученных данных показывает, что в базовом сценарии r_1 конфигурация a_1 , выбранная без учета рисков, демонстрирует несколько более высокие показатели ($K_r = 0,985$ против $0,982$). Однако при реализации рисков (сценарии $r_2 \div r_5$) конфигурация a_2 обеспечивает существенно лучшие показатели надежности (Приложение Л).

Наиболее ярко это проявляется в сценарии комплексного риска r_5 :

- K_r для a_2 составляет $0,945$ против $0,910$ для a_1 ;
- вероятность безотказной работ – $0,890$ против $0,820$;
- средняя наработка между отказами – 870 ч против 680 ч;
- вероятность образования очереди – $0,070$ против $0,120$.

Обобщенный критерий $K_{об}(a_j)$ для конфигураций составляет: $K_{об}(a_1) = 0,910$ (минимум достигается в сценарии r_5); $K_{об}(a_2) = 0,945$ (в сценарии r_5).

Таким образом, конфигурация a_2 обеспечивает повышение минимального уровня готовности на $3,5$ процентных пункта по сравнению с конфигурацией, выбранной без учета рисков.

Таким образом, практическая реализация метода в аналитической платформе и результаты расчетных экспериментов подтверждают, что разработанные методы и средства организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков являются работоспособными и эффективными.

5.4. Анализ устойчивости модели системы управления производством

При организации системы управления производством необходимо обеспечить его устойчивость и требуемое качество. Для этого нужно выбрать корректирующие звенья из условий устойчивости системы и установить связь между параметрами системы и ее динамикой.

Для проведения анализа устойчивости введем следующие обозначения: $x_i y_i z_i$ – агрегированные показатели автономного элемента на внешнем, концептуальном и внутреннем уровне, связанная с i -м элементом, α (β , ε) – допуски значений агрегированных значений. $K_\alpha W_\alpha(s)$, $K_\beta W_\beta(s)$, $K_\varepsilon W_\varepsilon(s)$ – передаточные функции каналов взаимодействия элементов СУ.

Если пренебречь связями между каналами, то вопрос об устойчивости СУ сводится к решению задачи об устойчивости трех одномерных каналов, описываемых следующими уравнениями:

Для внешнего уровня представления:

$$\begin{cases} F_1(x) = \int_{i=1}^k f_1(t) \\ F_2(x) = \int_{i=1}^k f_2(t), \\ F_3(x) = \int_{i=1}^k f_3(t) \end{cases}$$

где $F_1(x)$ – функция распределения длины маршрута блуждания взгляда, $F_2(x)$ – функция распределения значений ЧСС, $F_3(x)$ – функция распределения времени до целевого действия.

Для концептуального уровня:

$$\begin{cases} U_1(x) = \int_{i=1}^k u_1(t) \\ U_2(x) = \int_{i=1}^k u_2(t), \\ U_3(x) = \int_{i=1}^k u_3(t) \end{cases}$$

где $U_1(x)$ – функция распределения временной сложности алгоритма, $U_2(x)$ – функция распределения качества решения, $U_3(x)$ – функция распределения объема занимаемой памяти.

Для внутреннего уровня:

$$\begin{cases} V_1(x) = \int_{i=1}^k v_1(t) \\ V_2(x) = \int_{i=1}^k v_2(t) \end{cases},$$

где $V_1(x)$ – функция распределения объема занимаемой памяти, $V_2(x)$ – скорость обработки запроса.

Совокупность передаточных функций $v_i(s)$ назовем эквивалентной системой. С помощью метода эквивалентных систем оценим влияние на устойчивость взаимосвязей определенного типа в предположении, что другие связи отсутствуют и передаточные функции одномерных каналов одинаковы. Сущность метода заключается в замене трехмерной взаимосвязанной системы на систему, состоящую из трех одномерных каналов с передаточными функциями в разомкнутом состоянии $v_i(s)$, где $i = 1, 2, 3$, при чем обе с точки зрения устойчивости эквивалентны.

Метод эквивалентных систем позволяет оценить влияние связей на устойчивость как изменение передаточных функций разомкнутых систем независимых одномерных каналов или их частотных характеристик, что является удобным в практике.

Для устойчивости системы достаточно, чтобы одномерные каналы имели запас $\pm\lambda$ и были устойчивы при изменении N в пределах $N(1 \pm \lambda)$, где λ – максимальное допуска значения параметра.

Значение передаточных функций будет рассчитываться следующим образом:

$$\begin{aligned} K_1 W_1(s) &= \frac{K_\alpha W_\alpha(s)}{\cos \beta_0}; \\ K_2 W_2(s) &= K_\beta W_\beta(s); \\ K_3 W_3(s) &= K_\varepsilon W_\varepsilon(s). \end{aligned}$$

Крутизну характеристики разгрузки и корректирующие звенья найдем, выбрав для всех каналов значения показателя колебательности $M = 1,7$.

Для всех каналов передаточная функция корректирующих звеньев:

$$W_k(s) = \frac{(1 + T_1 s) \cdot (1 + T_r s)}{(1 + T_2 s) \cdot (1 + T_\phi s)}$$

Дифференцирующее звено $(1 + T_1 s)$ предназначено для компенсации постоянной времени, а апериодическое звено $\frac{1}{1 + T_\phi s}$ - для фильтрации переменных составляющих сигнала. Пренебрегая постоянной времени, имеем:

$$W_\alpha(s) = W_\beta(s) = W_\varepsilon(s) = \frac{(1 + T_1 s)}{(1 + T_2 s) \cdot (1 + T_\phi s)}$$

По показателю колебательности M , выбрав $T_\phi = 0,001$ сек, найдем величины

$$T_1 = \frac{1}{\omega_\delta} \sqrt{\frac{M}{M-1}} = \frac{1}{100} \sqrt{\frac{1,7}{1,7-1}} = 0,0156 \text{ сек};$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_\delta} \sqrt{\frac{M(M-1)}{M+1}} - T_\phi = \frac{1}{100} \sqrt{\frac{1,7(1,7-1)}{1,7+1}} - 0,001 = 0,00304 \text{ сек};$$

Уточним параметры разгрузки с учетом влияния взаимосвязей. Наиболее существенное влияние на устойчивость оказывает частота вносимых изменений в систему и ограничение вычислительных мощностей.

Для получения нормальных запасов устойчивости достаточно снизить частоту вносимых изменений одномерного канала в 1,312 раз.

5.5. Анализ качества модели архитектуры системы управления производством на основе автономных элементов

Обязательным условием для получения статистически значимых результатов является обеспечение стационарности исследуемых временных рядов. В целях устранения сезонности проводится дифференцирование ряда. Для показателей, выраженных в абсолютных величинах, осуществляется переход к годовым темпам прироста с помощью формулы:

$$\Delta x_t = \frac{x_t - x_{t-4}}{x_{t-4}},$$

где x_t – значение временного ряда в момент времени t .

Перед проведением анализа необходимо удостовериться в этом и провести тесты.

Тест Дики-Фуллера. При проведении данного теста проверяется гипотеза H_0 , согласно которой временной ряд является нестационарным. Тест включает в себя следующие этапы:

1. Построение авторегрессионной модели первого порядка по формуле:

$$\Delta x_t = \delta x_{t-1} + \varepsilon_t$$

2. Определение коэффициент δ методом наименьших квадратов и расчет t-статистики по формуле:

$$\tau = \frac{\delta}{SE(\delta)},$$

где $SE(\delta)$ – стандартная ошибка коэффициента δ .

3. Полученное значение τ сравнивается с критическим значением по таблице Маккиннона для определения p-value. В случае, если p-value $< 0,05$ H_0 отклоняется на 5%-ом уровне значимости, что свидетельствует о стационарности исследуемого временного ряда.

Тест Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина (КФШШ). В отличие от теста Дики-Фуллера, в данном тесте проверяется нулевая гипотеза H_0 о стационарности временного ряда. Процедура тестирования включает в себя следующие этапы:

1. Оценка параметров регрессии. На начальном этапе строится регрессионная модель и находятся остатки (e_t). При тестировании стационарности относительно уровня модель выражается по формуле:

$$y_t = \alpha + e_t,$$

где α – среднее значение ряда, определяемое методом МНК.

2. Определение сумм остатков по формуле:

$$S_t = \sum_{i=1}^t e_i ,$$

где $t=1,2, \dots, N$; N – объем выборки.

3. Для учета возможной автокорреляции в остатках рассчитывается долгосрочная дисперсия по формуле:

$$\hat{\sigma}_L^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e_t^2 + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^L w(k, L) \sum_{t=k+1}^N e_t e_{t-k} ,$$

где $w(k, L)$ – веса Бартлетта, которые вычисляются по формуле:

$$w(k, L) = 1 - \frac{k}{L+1} ,$$

где k – значение временного лага;

L - максимальное количество временных лагов, которое определяется по формуле:

$$L = \left\lfloor 4 * \sqrt[4]{\frac{N}{100}} \right\rfloor ,$$

4. Вычисление статистики теста по формуле:

$$k = \frac{\sum_{t=1}^N S_t^2}{N^2 \hat{\sigma}_L^2}$$

На основе полученного значения статистики определяется вероятность p -value по таблицам распределения Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина. Гипотеза H_0 принимается на уровне 5%-й значимости, если полученное p -value > 0,05.

В условиях малых выборок стандартные тесты (Дики-Фуллера и КФШШ) могут давать противоречивые результаты. Поэтому необходимо дополнить два указанных метода анализом автокорреляционной функции (АКФ).

Данный подход позволяет оценить скорость затухания корреляционных связей. Выборочную корреляционную функцию можно представить в виде формулы:

$$\hat{\rho}_k = \frac{\sum_{t=k+1}^N (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2},$$

k - значение временного лага, $k = 1, \dots, N-1$.

Характерной чертой нестационарных процессов является медленное затухание АКФ, при этом значение первого коэффициента автокорреляции $\hat{\rho}_1$ оказывается близким к единице. Тем самым, в качестве критерия прохождения теста будет применяться условие $\hat{\rho}_1 \leq 0,8$.

Ряд классифицируется как стационарный, если по результатам теста Дики-Фуллера было получено значение p -value $< 0,05$. В случае невыполнения описанного условия применяется тест КФШШ. Если полученное значение p -value второго теста будет больше 0,05 и анализ автокорреляционной функции покажет, что $\hat{\rho}_1 \leq 0,8$, то ряд так же классифицируется как стационарный.

Несоблюдение указанных критериев дает основание признать ряд нестационарным. В других случаях результат анализа на стационарность признается неоднозначным.

Если по результатам тестов ряд признается нестационарным или же полученные оценки являются неоднозначными, осуществляется неоднократное дифференцирование по формуле:

$$\Delta^n x_i = \Delta^{n-1} x_i - \Delta^{n-1} x_{i-1},$$

где n – порядок приращения.

Процедура последовательного дифференцирования и тестирования повторяется до тех пор, пока не ряд не станет стационарным.

Основной моделью является прогнозирование с использованием разложения в ряд Фурье по формуле:

$$y_t = \alpha + \sum_{k=0}^{N-1} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{N}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{N}\right) \right) + \varepsilon_t,$$

где α — постоянное число;

a_k, b_k — амплитудные коэффициенты;

k — номер гармоники;

ε_t — ошибка прогноза.

Разложение в ряд Фурье позволяет описать динамику с использованием меньшего количества параметров, что делает модель сбалансированной. В то же время основным ограничением является предположение о неизменности отобранных частот и значений амплитуд на всем промежутке прогнозных значений. Данный подход позволяет минимизировать влияние случайных процессов, формируя сглаженную прогнозную траекторию, что обеспечивает получение более устойчивых оценок будущих значений индикаторов.

Так как к временному ряду уже была применена Med-MAD стандартизация, то можем провести спектральный анализ. В связи с тем, что данные о показателях являются дискретными, применим к ним дискретное преобразование Фурье в соответствии с формулой:

$$X(k) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kt},$$

где k — номер гармоники, $k \in \{0, 1, \dots, N-1\}$;

$X(k)$ — комплексный коэффициент Фурье;

t — индекс суммирования;

N — общее количество наблюдений в ряду.

После того, как к данным было применено дискретное преобразование Фурье, необходимо провести оценку спектра мощности. Для этого построим периодограмму, используя формулу:

$$I_N(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2,$$

$I_N(k)$ — периодограмма гармоники номера k .

Согласно свойству сопряженной симметрии дискретного преобразования Фурье для вещественного сигнала, значения спектра на частотах выше ча-

стоты Найквиста являются избыточными. Тем самым, вся информация о гармоническом составе показателей содержится в первой половине спектра, при $0 \leq k \leq \frac{N}{2}$. Следовательно, после построения периодограммы для каждого из показателей, выбираются множество наиболее значимых частот $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\} \subset \{0, 1, \dots, \frac{N}{2}\}$, $m = |K|$, соответствующих наибольшему спектральному мощностям.

Тем самым, прогнозные значения показателей можно представить в виде формулы:

$$\hat{y}_t = \alpha + \sum_{k \in \{K\}} (a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N}t\right)),$$

где K — множество наиболее значимых частот.

Так как каждый комплексный коэффициент Фурье можно разложить на составляющие по формуле:

$$X(k) = A_k - jB_k,$$

где A_k — вещественная компонента спектра;

B_k — мнимая компонента спектра.

Тем самым значения амплитудных коэффициентов вычисляются по формулам учитывая нормировку на объем выборки и сложение вкладов сопряженных частот:

$$a_k = \frac{2}{N} * A_k = \frac{2}{N} \operatorname{Re}(X(k))$$

$$b_k = \frac{2}{N} * B_k = -\frac{2}{N} \operatorname{Im}(X(k))$$

Значение постоянного коэффициента α вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{N} * X(0) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} x(t)$$

Однако построение модели на основе наибольших значений периодограммы, обеспечивает лишь дискретное приближение к истинным параметрам

процесса. Частотное разрешение дискретного преобразования Фурье ограничено величиной $\frac{2\pi}{N}$, что соответствует шагу расчетной сетки $j \frac{2\pi}{N}$. Тем самым, если истинная частота циклической компоненты (w_k) не совпадает с узлом данной сетки, то возникает погрешность оценки.

Для преодоления ограничения дискретности будет использоваться нелинейный метод наименьших квадратов. Математически данную задачу можно поставить в соответствии с формулой:

$$\Phi(\beta) = \sum_{t=1}^n [y_t - \hat{y}_t(\beta)]^2 \rightarrow \min_{\beta},$$

где $\hat{y}_t(\beta)$ – прогнозные значения.

$\beta = [\alpha, a_{k_1}, b_{k_1}, a_{k_2}, b_{k_2}, \dots, a_{k_m}, b_{k_m}, w_1, \dots, w_m]^T, \theta \in R^{3m+1}$ – вектор оцениваемых параметров модели.

Частоты, идентифицируемые по периодограмме, рассматриваются как начальные приближения. Дальнейшее уточнение параметров и решение задачи проводится итерационным путем с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта, что связано с нелинейностью функции $\hat{y}_t(\beta)$ относительно параметров w_k .

Необходимым условием достижения минимума функции $\Phi(\beta)$ является равенство нулю ее градиента по всем компонентам вектора β . Тогда система будет состоять из $3m + 1$ уравнений, определяемых формулами:

$$\frac{\partial \Phi(\beta)}{\partial \alpha} = -2 \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t(\beta)) = 0$$

$$\frac{\partial \Phi(\beta)}{\partial a_k} = -2 \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t(\beta)) \cos(2\pi w_k t) = 0, \forall k \in \{K\}$$

$$\frac{\partial \Phi(\beta)}{\partial b_k} = -2 \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t(\beta)) \sin(2\pi w_k t) = 0, \forall k \in \{K\}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial w_k} = -2 \sum_{t=1}^n ((y_t - \hat{y}_t(\beta)) * (-2\pi t \cdot a_k \sin(2\pi w_k t) +$$

$$+ 2\pi t \cdot b_k \cos(2\pi w_k t))) , \forall k \in \{K\}$$

Алгоритм Левенберга-Марквардта реализуется по следующим шагам. На предварительном этапе задается нулевой вектор значений оцениваемых параметров $b^{(0)}$. Для обеспечения устойчивой сходимости алгоритма начальное значение коэффициента Левенберга λ устанавливается на уровне 0,01, что соответствует методическим рекомендациям Д. Маркварда.

На первом этапе каждой итерации (r) вычисляется матрица Якоби $P^{(r)}$ размерностью $n \times k$, где $k = 3m + 1$. Затем осуществляется определение вектора приращений $\delta^{(r)}$ путем решения системы уравнений, задаваемой формулой:

$$(A^{(r)} + \lambda^{(r)}I)\delta^{(r)} = (P^{(r)})^T (Y - \hat{Y}_t^{(r)}),$$

где $A^{(r)} = (P^{(r)})^T P^{(r)}$ — аппроксимация матрицы Гессе на итерации r ;

$\lambda^{(r)}$ — коэффициент Левенберга на итерации r .

На втором этапе определяется новый вектор значений оцениваемых параметров $b^{(r+1)}$ по формуле:

$$b^{(r+1)} = b^{(r)} + \delta^{(r)}$$

На третьем этапе вычисляется новое значение суммы квадратов остатков $\Phi^{(r+1)}$ и сравнивается с $\Phi^{(r)}$. В зависимости от результата сравнения принимается одно из двух решений:

- Если $\Phi^{(r+1)} \leq \Phi^{(r)}$:

Уменьшение суммы квадратов остатков свидетельствует о том, что новые значения оцениваемых параметров $b^{(r+1)}$ принимаются и будут использоваться на следующей итерации. Новый параметр демпфирования определяется по формуле:

$$\lambda^{(r+1)} = \frac{\lambda^{(r)}}{v},$$

где v — коэффициент изменения темпов сходимости, $v > 1$.

- Если $\Phi^{(r+1)} > \Phi^{(r)}$:

Увеличение суммы квадратов остатков свидетельствует о том, что обновление вектора значений параметров не происходит. Новая величина $\lambda^{(r+1)}$ определяется по формуле:

$$\lambda^{(r+1)} = \lambda^{(r)} * v$$

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено одно из условий стабилизации.

1. Стабилизация целевой функции, данное условие определяется формулой:

$$\frac{|\Phi^{(r+1)} - \Phi^{(r)}|}{\Phi^{(r)}} < \rho,$$

где ρ — критическое значение относительного изменения.

2. Стабилизация вектора значений параметров, определяемая по формуле:

$$\frac{\|\delta^{(r)}\|}{\tau + \|b^{(r)}\|} < \varepsilon,$$

где τ — малое постоянное число;

ε — порог сходимости.

Данный алгоритм повторяется для каждого количества q гармонических компонент ($q \in \{1, \dots, K\}$). Добавление новых слагаемых в прогнозную модель осуществляется путем последовательного включения гармоник в порядке убывания спектральной мощности. Данный процесс прекращается, когда относительный прирост коэффициента детерминации по сравнению с моделью предыдущего порядка становится менее 1%. Тем самым, описанное выше ограничение позволит избежать избыточной параметризации.

Для оценки ошибки прогнозирования используется интегральная мера отклонения, представляющая собой площадь между действительной и выявленной прогнозной функциями показателя, определяемая по формуле:

$$S_{\text{ошибки}} = \int_{N_1}^{N_1+h} |y(t) - \hat{y}(t)| dt,$$

где h — количество прогнозных кварталов;

N_1 — номер квартала, на котором закончилось обучение модели.

Учитывая дискретный характер данных, расчет указанной величины аппроксимируется по формуле:

$$S_{\text{ошибки}} \approx \sum_{i=1}^{h-1} \left(\frac{|e(t_i)| + |e(t_{i+1})|}{2} \right) \Delta t ,$$

$e(t_i)$ — абсолютная ошибка прогноза в момент времени t_i .

Проверка прогностических свойств модели осуществляется путем итерационного смещения границы раздела выборки

Для дальнейшей оценки значений применяется метод скользящего начала. Для каждого фиксированного горизонта прогнозирования производится расчет серии ошибок прогноза путем последовательного смещения точки окончания обучения и определяется среднее значение полученных результатов.

Для дальнейшего проведения комплексного анализа качества прогнозной модели будут использоваться две группы показателей.

Среднеквадратичная ошибка (mean squared error, MSE), определяемая по формуле:

$$MSE = \frac{1}{N - R + 1} \sum_{t=R}^N (\hat{y}_t - y_t)^2 ,$$

где R — период начала тестового участка данных.

Средняя абсолютная ошибка (mean absolute error, MAE) рассчитывается по формуле:

$$MAE = \frac{1}{N - R + 1} \sum_{t=R}^N |\hat{y}_t - y_t| ,$$

Средняя абсолютная процентная ошибка (mean average percentage error, MAPE), определяемая по формуле:

$$MAPE = \frac{100}{N - R + 1} \sum_{t=R}^N \left| \frac{\hat{y}_t - y_t}{y_t} \right| ,$$

Симметричная средняя абсолютная процентная ошибка (symmetric mean absolute percentage error, SMAPE), которая определяется по формуле:

$$SMAPE = \frac{200}{N - R + 1} \sum_{t=R}^N \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{|y_t| + |\hat{y}_t|},$$

Средняя абсолютная масштабированная ошибка (mean absolute scaled error, MASE), определяемая по формуле:

$$MASE = \frac{\frac{1}{N - R + 1} \sum_{t=R}^N |\hat{y}_t - y_t|}{\frac{1}{N - 1} \sum_{t=2}^N |y_t - y_{t-1}|}$$

Вторая группа определяет относительное качество прогноза.

U-коэффициент Тейла, оценивающий качество прогноза относительного наивного. Значение определяется по формуле:

$$U(h) = \sqrt{\frac{\sum_{t=R}^{N-h} (\hat{y}_{t+h} - y_{t+h})^2}{\sum_{t=R}^{N-h} (y_t - y_{t+h})^2}}$$

Если $U(h) \geq 1$, то прогноз $\hat{y}_{t+h}$ не лучше наивного, при котором $y_{t+h} = y_t$; если $U(h) < 1$, то прогноз $\hat{y}_{t+h}$ лучше наивного.

Разложение в ряд Фурье требует первоначального определения наиболее значимых частот, которые описывают показатель. Для этого воспользуемся дискретным преобразованием Фурье.

Далее были определены значения периодограмм $I_N(k)$, которые являются безразмерными, так как к ряду было применено Med-MAD-преобразование. Результаты подсчета для каждого из выбранных показателей представлены на рисунках 79-81.

После этого применим алгоритм Левенберга-Марквардта. Результаты оценок значений параметров до и после уточнения представлены в таблице 16. После нахождения оценок параметров модели, объем данных итерационно увеличивается до момента достижения $N - 4$. Итоговая величина ошибки прогноза модели для каждого горизонта планирования h считается как среднее

арифметическое всех ошибок, полученных на прошлых шагах итерационного процесса. Финальные параметры моделей представлены в таблице 17.

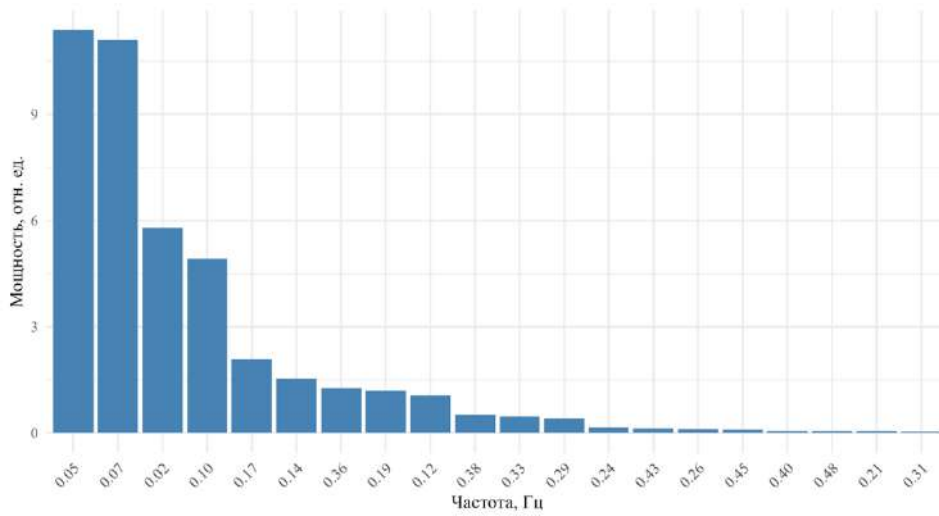


Рисунок 79 — Периодограмма изменений агрегированных показателей внешнего представления СУ

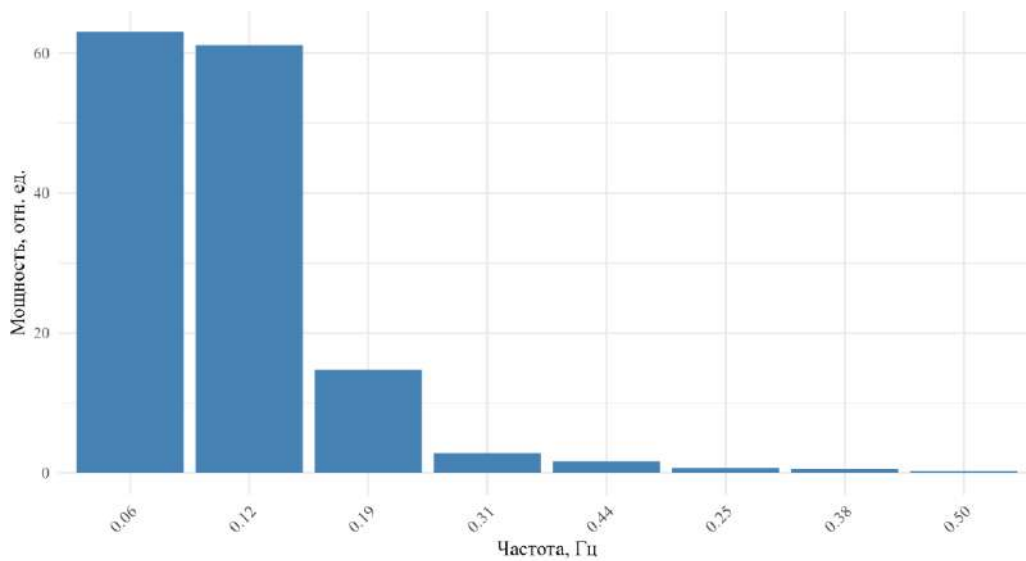


Рисунок 80 — Периодограмма изменений уровня агрегированных показателей концептуального представления СУ

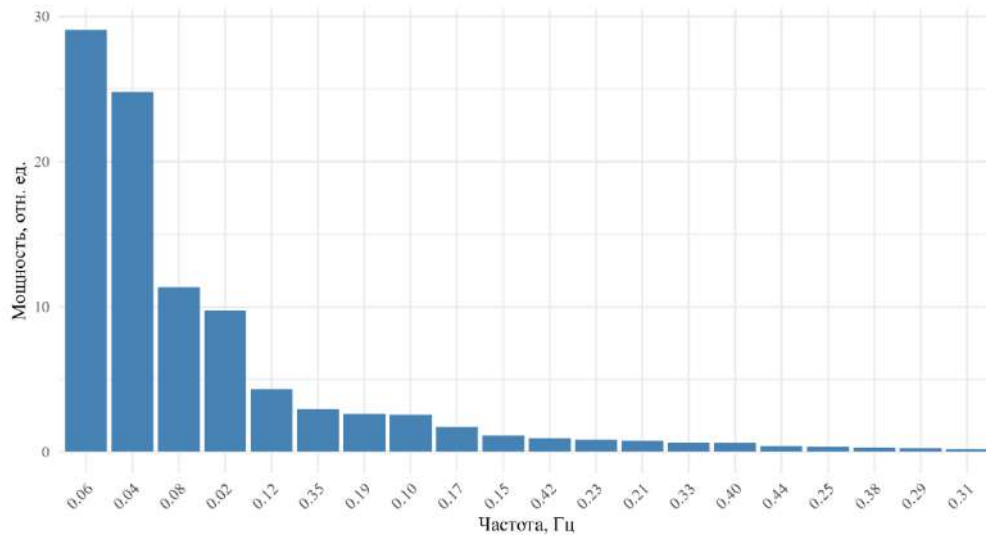


Рисунок 81 – Периодограмма изменений агрегированных показателей внутреннего представления СУ

Таблица 16 – Значения параметров до и после применения алгоритма Левенберга-Марквардта

Параметр	Значение до алгоритма, отн. ед.	Значение после алгоритма, отн. ед.	Параметр	Значение до алгоритма, отн. ед.	Значение после алгоритма, отн. ед.
α	0.00	0,14	α	0.00	-0,35
a_1	0,8	3,79	a_1	1,56	65,43
b_1	0,67	-6,01	b_1	0,06	-114,04
k_1	0,05	0,05	k_1	0,06	0,06
a_2	0,45	-5,14	a_2	1,42	9,86
b_2	-0,93	2,87	b_2	-0,2	105.00
k_2	0,07	0,05	k_2	0,04	0,06
a_3	0,5	2,27	a_3	0,41	-49,99
b_3	-0,55	1,52	b_3	-0,88	41,31
k_3	0,02	0,04	k_3	0,08	0,06
a_4	0,4	0,34	a_4	0,89	-20,9
b_4	-0,55	0,17	b_4	-0,12	-32,06

Параметр	Значение до алго- ритма, отн. ед.	Значение после ал- горитма, отн. ед.	Параметр	Значение до алго- ритма, отн. ед.	Значение после ал- горитма, отн. ед.
k_4	0,1	0,1	k_4	0,02	0,05
a_5	-0,42	-6,67	α	0.00	0.00
b_5	-0,15	5,2	a_1	-3,74	-3,74
k_5	0,17	0,17	b_1	-1,33	-1,33
a_6	-0,12	3,56	k_1	0,06	0,06
b_6	-0,36	-2,35	a_2	-1,07	-1,07
k_6	0,14	0,17	b_2	3,76	3,76
a_7	0,13	-0,09	k_2	0,13	0,13
b_7	-0,32	-0,35	a_3	1,87	1,87
k_7	0,36	0,35	b_3	0,45	0,45
a_8	0,03	3,56	k_3	0,19	0,19
b_8	0,34	-2,88	a_4	0,76	0,76
k_8	0,19	0,17	b_4	-0,35	-0,35
k_4	0,31	0,31	b_2	1,13	2,39
a_5	0,51	0,51	k_2	0,08	0,09
b_5	0,38	0,38	a_3	-0,19	3,1
k_5	0,44	0,44	b_3	1,1	0,86
a_6	0,32	0,32	k_3	0,11	0,1
b_6	0,26	0,26	a_4	0,49	-0,1
k_6	0,25	0,25	b_4	0,35	-2,66
α	-	2,36	k_4	0,03	0,01
a_1	1,63	0,71	a_5	0,34	0,24
b_1	-0,19	-1,32	b_5	0,26	0,3
k_1	0,06	0,05	k_5	0,33	0,34
a_2	0,85	-2,37	a_6	0,13	0,1

Параметр	Значение до алго- ритма, отн. ед.	Значение после ал- горитма, отн. ед.	Параметр	Значение до алго- ритма, отн. ед.	Значение после ал- горитма, отн. ед.
b_2	1,13	2,39	k_4	0,31	0,31

Таблица 17 – Финальные оценки параметров моделей

Параметр	Значение, отн. ед.	Параметр	Значение, отн. ед.	Параметр	Значение, отн. ед.
α	4,09	a_3	0,74	b_4	-0,14
a_1	-1,3	b_3	0,65	k_4	0,08
b_1	3,22	k_3	0,13	a_5	-0,12
k_1	0,01	a_4	0,04	b_5	0,2
a_2	-0,27	b_4	0,01	k_5	0,08
b_2	0,21	k_4	0,05		
k_2	0,06	a_5	-0,02		
a_3	0,31	b_5	0,11		
b_3	-0,09	k_5	0,07		
k_3	0,1	a_6	-0,66		
a_4	-2,67	b_6	-0,74		
b_4	-6,93	k_6	0,13		
k_4	0,01	α	0.00		
a_5	0,01	a_1	0.00		
b_5	0,27	b_1	0,01		
k_5	0,09	k_1	0,04		
a_6	0,13	a_2	0.00		
b_6	-0,06	b_2	0,01		
k_6	0,18	k_2	0,13		
a_7	0,08	a_3	0.00		

Параметр	Значение, отн. ед.	Параметр	Значение, отн. ед.	Параметр	Значение, отн. ед.
b_7	0,03	b_3	-0,01		
k_7	0,15	k_3	0,09		
α	0.00	a_4	0.00		
a_1	0,09	b_4	0.00		
b_1	-0,02	k_4	0,17		
k_1	0,11	a_5	0.00		
a_2	0,08	b_5	0.00		
b_2	0,1	k_5	0,21		
k_2	0,09	a_4	0,17		

Результаты прогнозирования показателей, включающие точечные оценки и границы прогнозных интервалов представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Прогнозные значения показателей

Показатель	Прогноз на 1 квартал 2026, % г/г	Прогноз на 2 квартал 2026, % г/г	Прогноз на 3 квартал 2026, % г/г	Прогноз на 4 квартал 2026, % г/г
Агрегированный показатель пред- ставления си- стемы на внеш- нем уровне	$17,65 \pm 20,73$	$71,35 \pm 41,90$	$121,10 \pm 69,25$	$140,25 \pm 82,42$
Агрегированный показатель пред- ставления си- стемы на кон- цептуальном уровне	$3,37 \pm 9,49$	$4,56 \pm 16,00$	$4,05 \pm 19,15$	$4,32 \pm 21,28$

Показатель	Прогноз на 1 квартал 2026, % г/г	Прогноз на 2 квартал 2026, % г/г	Прогноз на 3 квартал 2026, % г/г	Прогноз на 4 квартал 2026, % г/г
Агрегированный показатель пред- ставления си- стемы на внут- реннем уровне	$0,52 \pm 0,40$	$1,45 \pm 0,88$	$2,06 \pm 1,36$	$1,67 \pm 1,58$
Агрегированный показатель каче- ства СУ	$18,88 \pm 2,79$	$22,03 \pm 6,15$	$26,79 \pm 10,10$	$31,84 \pm 15,40$

Для визуализации результатов моделирования были построены графики прогнозных значений, представленные на рисунках 82–85.

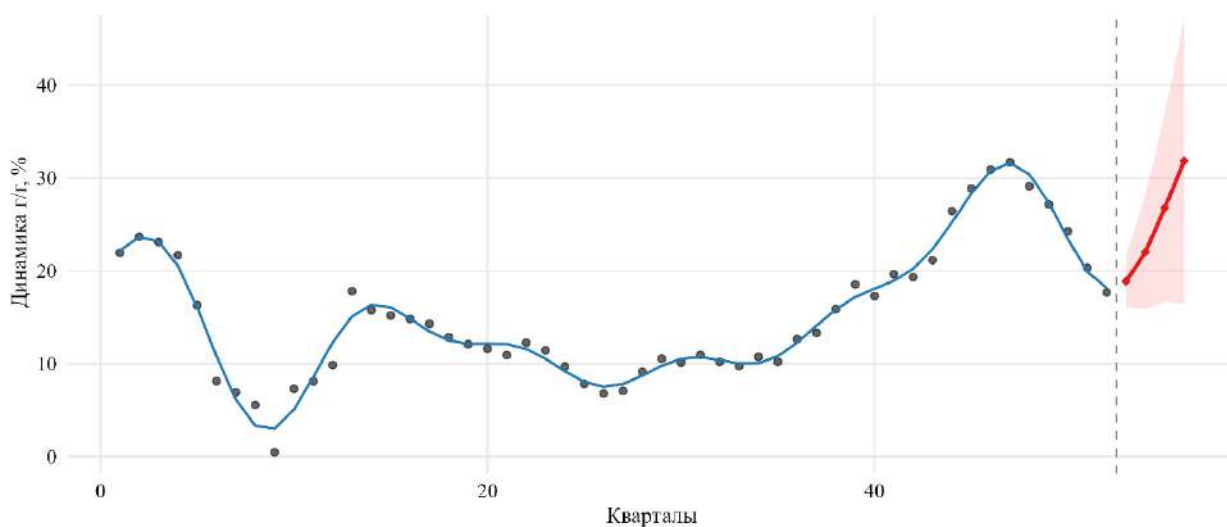


Рисунок 82 — Исторические и прогнозные значения агрегированного показателя представления системы управления производством на внешнем уровне

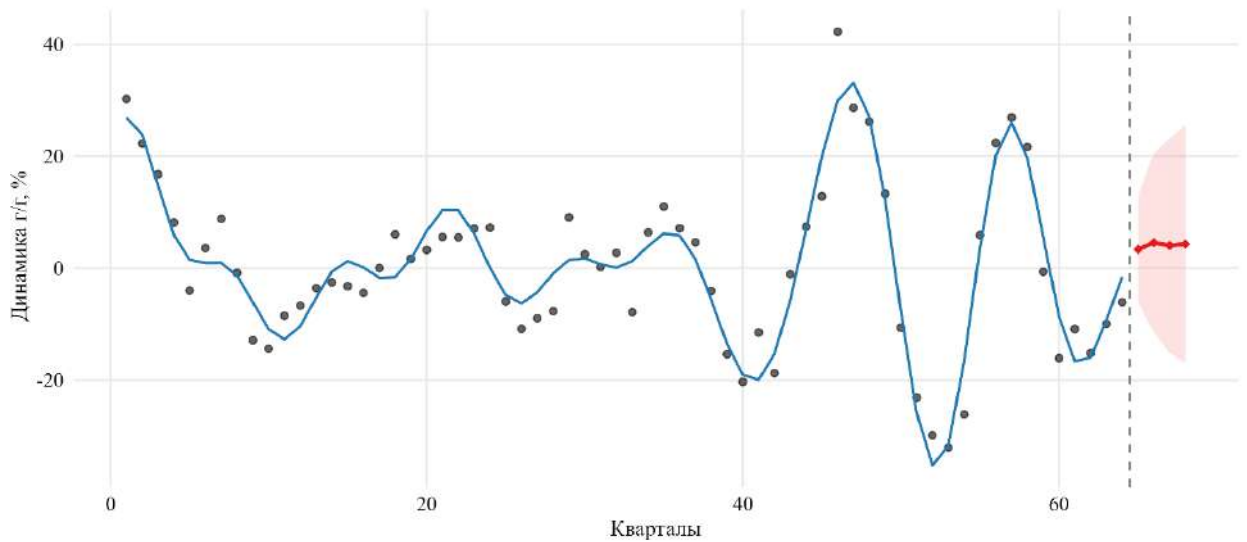


Рисунок 83 — Исторические и прогнозные значения агрегированного показателя представления системы управления производством на концептуальном уровне

Проанализировав рисунок 83, можно сделать вывод, что модель прогнозирует сохранение изменений в диапазоне 3,4-4,5%.

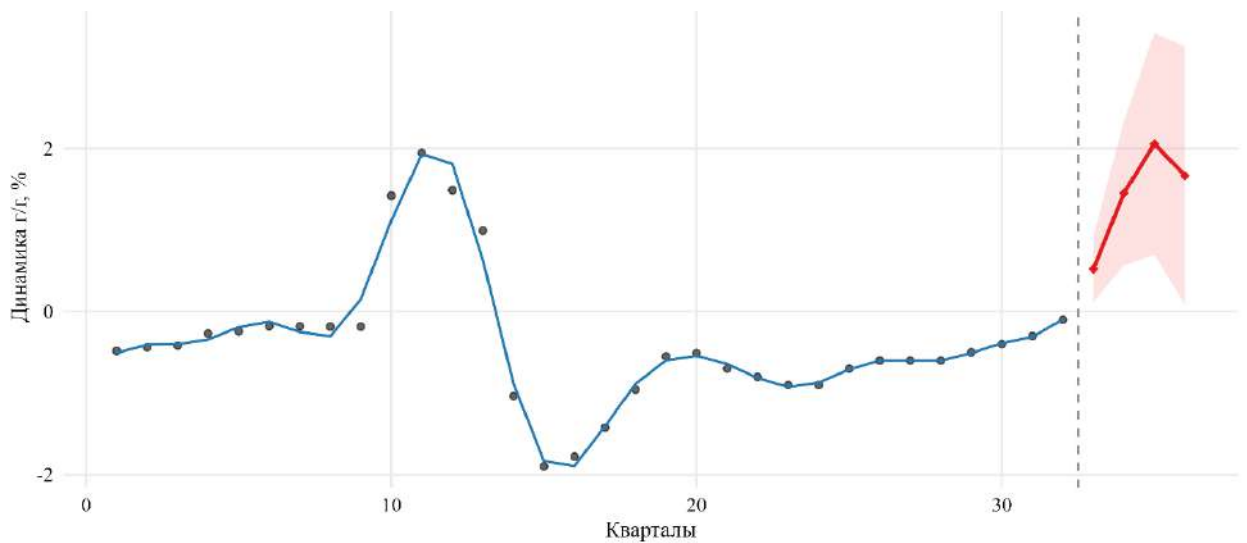


Рисунок 84 — Исторические и прогнозные значения агрегированного показателя представления системы управления производством на внутреннем уровне

Ожидаемая динамика значения агрегированного показателя представления системы управления производством на внутреннем уровне, представленная на рисунке 84 свидетельствует об снижении значения качества, что связано с глобальным дефицитом вычислительных мощностей.

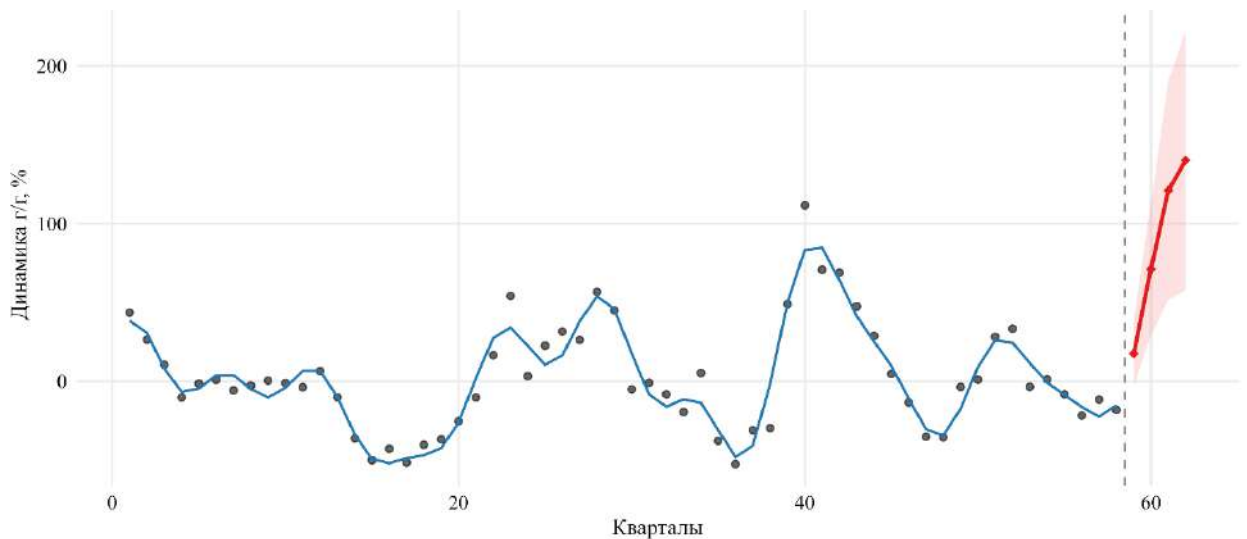


Рисунок 85 – Исторические и прогнозные значения изменения агрегированного показателя качества СУ

Наибольшее изменение динамики наблюдается в прогнозе на уровне 140%.

Для оценки качества будем использовать ранее предложенные показатели, однако следует отметить, что метрики MSE и MAE не будут использоваться.

Применив формулы были получены следующие значения, представленные в таблице 19.

Таблица 19 – Статистические характеристики качества прогнозов

Метрика	1 квартал	2 квартала	3 квартала	4 квартала
MAPE	459,15	49,04	113,61	175,21
SMAPE	62,82	64,24	200	200
MASE	2,99	3,18	6,5	9,26
U Тейла	2,6	1,8	2,17	2,32
MAPE	627,79	339,68	131,17	344,8
SMAPE	137,8	161,55	168,39	107,3
MASE	3,63	3,1	2,45	2,16
U Тейла	2,08	0,93	0,58	0,52
MAPE	1064,64	515,17	145,33	572,29
SMAPE	143,32	146,25	135,88	124,17

Метрика	1 квартал	2 квартала	3 квартала	4 квартала
MASE	2,56	1,49	0,81	1,42
U Тейла	2,6	0,97	0,47	0,65
MAPE	1400,05	706,04	142,34	672,4
SMAPE	200	193,65	105,82	115,89
MASE	2,7	1,4	0,37	0,88
U Тейла	4,77	1,42	0,37	0,82

Анализ полученных значений показал, что точность модели меняется в зависимости от срока прогноза довольно неоднозначно. Аномально высокие значения SMAPE и MAPE обусловлены тем, что данная метрика применялась к стандартизированным данным, принадлежащим сегменту $[-a; a]$, $a \in R$. Тем самым, расчет значений приводит к искажению вывода об оценке качества прогнозов построенной модели.

Тем не менее, согласно концепции Г. Тейла, одним из основных критериев эффективности является U-коэффициент, значения которого в данном случае опускаются ниже единицы при прогнозировании на 2–4 квартала. Это подтверждает, что разложение в ряд Фурье превосходит по точности наивный прогноз в указанных горизонтах.

Значение $MASE < 1$ свидетельствует о том, что точность предлагаемой модели превосходит среднюю историческую точность наивного метода прогнозирования. Это указывает на то, что ошибка прогноза предлагаемой модели выше средней величины квартальных изменений ряда. В то же время значения U-коэффициента для данных показателей на горизонте прогнозирования более двух кварталов остается меньше единицы. Данное рассогласование метрик обусловлено тем, что U Тейла сопоставляет ошибку модели с наивным прогнозом в тестовом периоде.

5.6. Практическая реализация и внедрение результатов диссертации

Разработанная методология организации системы управления машиностроительным производством, включает:

- представление системы управления в виде совокупности автономных элементов (холонов);
- трехуровневое рассмотрение каждого холона: внешний, концептуальный и внутренний уровни;
- формализацию требований к системе управления с использованием методов обработки текстов;
- оценка внешнего уровня представления элементов системы управления с использованием эргатических подходов;
- оценку концептуального уровня по показателям быстродействия, точности и объемам занимаемой памяти вычислительных алгоритмов;
- оценку внутреннего уровня по показателям объема данных и стоимости выполнения SQL-запросов;
- применение методов многокритериальной оптимизации для выбора конфигурации системы управления;
- разработку аналитической платформы для мониторинга показателей качества и надежности системы управления в режиме реального времени;
- анализ устойчивости и качества системы управления с позиций теории систем, где качество интерпретируется как величина ошибки.

Оценка уровня цифровой зрелости предприятия позволяет установить степень готовности существующей информационной инфраструктуры к внедрению холонической архитектуры и аналитической платформы, определить, какие автономные элементы уже существуют и могут быть включены в конфигурацию, а какие требуют разработки или модернизации и задать реалистичный масштаб изменений и приоритизацию проектов [288].

В диссертации для оценки цифровой зрелости предложен метод, включающий:

- анализ существующих систем управления производством, учета, анализа защищенности, систем мониторинга;
- оценку степени интеграции и автоматизации процессов: наличие единого хранилища данных, витрин, механизмов обмена между системами;

- оценку качества и полноты данных: наличие необходимых показателей для внешнего, концептуального и внутреннего уровней холонов;
- сопоставление текущего состояния с целевой моделью архитектуры системы управления, построенной на основе автономных элементов.

Результатом применения метода оценки цифровой зрелости является позиционирование предприятия по шкале зрелости. Для рассматриваемых предприятий установлено, что:

- информационная инфраструктура обладает развитой системой контроля защищенности и системой управления требованиями;
- имеется центральное хранилище данных и возможность формирования витрин, что позволяет реализовать аналитическую платформу;
- данные о производственных процессах, уязвимостях, стандартах и активах доступны в достаточном объеме для построения расчетных показателей.

Это позволяет отнести предприятия к группе объектов с средним или высоким уровнем цифровой зрелости, что делает возможным внедрение холонической архитектуры системы управления многокритериальных процедур выбора конфигурации и аналитической платформы для мониторинга и оценки качества системы управления.

Оценка цифровой зрелости используется как исходное условие при выборе исходной конфигурации холонов, определении набора критериев и показателей, подлежащих мониторингу и при интерпретации результатов оптимизации и анализа устойчивости с учетом реального уровня развития информационных систем предприятия.

Надежность системы управления машиностроительным производством определяется не только техническим состоянием оборудования и программных компонентов, но и качеством работы оператора, уровнем его стресса и вероятностью ошибок при взаимодействии с системой. В главе 3 разработана модель надежности, учитывающая человеческий фактор через изменение потока отказов в зависимости от стрессового состояния оператора.

Для учета человеческого фактора вводится дополнительная компонента потока отказов $\lambda_H(S)$, зависящая от уровня стресса оператора $S \in [0,1]$, определяемого по физиологическим показателям (частота сердечных сокращений, вариабельность пульса, косвенные эргономические показатели).

На основании экспериментальных данных установлены характерные значения $\lambda_H(S)$:

- при $S = 0$ (стресса нет) $\lambda_H(0) \approx 0$ – человеческий фактор практически не влияет на надежность;
- при $S = 0,5$ (умеренный стресс) $\lambda_H(0,5) \approx 0,3\lambda_T$;
- при $S = 1,0$ (сильный стресс) $\lambda_H(1,0) \approx 1,5\lambda_T$.

Таким образом, переход от комфортного состояния к высокому стрессу приводит к увеличению суммарного потока отказов в 1,3–2,5 раза.

Если оператор работает в стандартном интерфейсе, вызывающем умеренный стресс ($S \approx 0,5$), то:

$$\lambda(0,5) = \lambda_T + \lambda_H(0,5) \approx \lambda_T + 0,3\lambda_T = 1,3\lambda_T = 0,013.$$

Если интерфейс оптимизирован (глава 4) и стресс снижен до $S \approx 0,35$, можно принять:

$$\lambda_H(0,35) \approx 0,2\lambda_T, \lambda(0,35) = 1,2\lambda_T = 0,012.$$

Тогда при фиксированном интервале t (например, $t = 100$ суток) вероятности безотказной работы будут отличаться:

$$P_{\text{sys}}^{\text{CT}}(t) \approx 1 - (1 - e^{-0,013t})^3,$$

$$P_{\text{sys}}^{\text{ОПТ}}(t) \approx 1 - (1 - e^{-0,012t})^3.$$

Если принять, что за счет оптимизации интерфейса и снижения стресса поток отказов снижается более существенно (как показано в главе 4, примерно на 45%), то:

$$\lambda^{\text{CT}} \approx 0,011, \lambda^{\text{ОПТ}} \approx 0,006,$$

и при тех же условиях эксплуатации:

$$P_{\text{sys}}^{\text{CT}}(t) \approx 1 - (1 - e^{-0,011t})^3,$$

$$P_{\text{sys}}^{\text{ОПТ}}(t) \approx 1 - (1 - e^{-0,006t})^3.$$

Расчет показывает, что при переходе от стандартного интерфейса к оптимизированному вероятность отказа системы снижается примерно на 45%, что количественно подтверждает влияние качества человеко-машинного взаимодействия на надежность архитектуры системы управления.

Модель надежности с учетом человеческого фактора далее интегрируется в обобщенную структуру СППР и в критерии выбора конфигурации архитектуры системы управления, поскольку надежность является одним из ключевых критериев внутреннего уровня холонов.

Для практического выбора конфигурации архитектуры системы управления машиностроительным производством разработана обобщенная структура СППР.

Структура СППР включает следующие основные блоки.

1) Блок ввода исходных данных. В качестве исходных данных СППР использует:

- текстовые требования пользователя к системе управления. Где пользователь формулирует требования в виде текстов (регламенты, технические задания, описания сценариев использования, требования к отчетности и интерфейсам).
- оценки цифровой зрелости предприятия, которые определяют исходное состояние информационной инфраструктуры и границы реалистичных изменений.
- результаты оценки надежности с учетом человеческого фактора, включающие параметры λ_T , $\lambda_H(S)$, вероятности отказов и запас устойчивости.
- оценка четких и нечетких критериев по внешнему, концептуальному и внутреннему уровням каждого холона.

Таким образом, входной блок СППР объединяет семантический анализ текстовых требований (формализованное представление желания пользователя) и количественные оценки состояния и качества системы управления, создавая полный набор данных для принятия решений о конфигурации архитектуры.

2) Блок нормализации и свертки критериев

Выбор именно сигмоидной нормализации данных и свертка критериев методом *critic-m*, позволяет делать нормализованные критерии чувствительными к пороговым значениям, что отвечает требованиям теории систем к оценке критических режимов, а *critic-m* обеспечивает объективное формирование весов при свертке критериев в СППР, учитывая данные реально полученных оценок.

3) Блок генерации альтернатив конфигурации

Формирует множество возможных конфигураций системы управления:

$$\mathcal{C} = H_1 \times H_2 \times \dots \times H_m,$$

где H_i – множества холонов разных типов (заказов, ресурсов, продуктов, цеха, HMS, DWH). При генерации альтернатив учитываются: формализованные текстовые требования; уровень цифровой зрелости (какие холоны доступны или могут быть созданы).

4) Блок многокритериальной оценки конфигураций

Для каждой конфигурации $C \in \mathcal{C}$ рассчитывается вектор критериев:

- суммарная комплексная оценка по НЛВ;
- суммарное время работы алгоритмов;
- суммарный объем данных;
- суммарная стоимость SQL-запросов;
- вероятность безотказной работы;
- степень соответствия формализованным требованиям пользователя.

5) Блок принятия решения реализует:

- отбор недоминируемых конфигураций по Парето;
- выбор единственной конфигурации по агрегированной целевой функции с весами, отражающими приоритеты пользователя и предприятия (качество интерфейса, быстродействие, надежность, ресурсы, соответствие требованиям)

В результате разработанной холонической архитектуры и механизмов гибридного выбора конфигурации теоретические модели архитектуры СУ получили практическую реализацию, позволяющую адаптировать систему управления к конкретным условиям эксплуатации и уровню цифровой зрелости предприятия.

На внешнем уровне проведены эксперименты по оценке интерфейсов: измерено время решения задач, частота сердечных сокращений, длина маршрута блуждания взгляда, количество ошибок; показано, что текущий интерфейс вызывает трудности у большинства пользователей (рост ЧСС до 34,6% в среднем, ошибки у 15% респондентов).

С использованием метода *Pareto simulated annealing*: сформулирована многокритериальная задача оптимизации компоновки элементов интерфейса по длине маршрута блуждания взгляда, отклонению ЧСС и времени до целевого действия; реализован алгоритм генерации конфигураций интерфейса, оценки по нормированным критериям и обновления множества недоминируемых решений (фронт Парето); получены практические результаты: сокращение длины маршрута взгляда на 15–25%; сокращение времени до целевого действия на 20–30%; снижение уровня стресса (ЧСС) на 10–15%.

На концептуальном уровне получены количественные оценки: точные методы оптимальны при малых размерностях, но имеют экспоненциальный рост времени; эвристики обеспечивают приемлемую точность при существенно меньших временных затратах.

На внутреннем уровне разработаны модели нормализации и денормализации схем баз данных, формальная постановка задачи многокритериальной оптимизации по объему данных и стоимости SQL-запросов и проведен анализ и оптимизация стоимости запросов методом внутренней точки, сформулированы практические рекомендации по структуре запросов и настройке БД.

Оценка критериев архитектуры методами нечеткой логики на основе НЛВ: построена каскадная схема из трех уровней; обработаны данные опроса

60 пользователей по 11 критериям; получены численные значения агрегированных критериев.

Построена архитектура на основе автономных элементов и гибридный подход к выбору конфигурации на основании холонической концепции. Разработана архитектура системы управления как совокупности автономных элементов: заказов, ресурсов, продуктов, цеха, HMS, DWH; определены их взаимодействия; реализован механизм гибридного выбора конфигурации, основанный на комплексной оценке холонов, многокритериальной оценке конфигураций и адаптивном переключении конфигураций при изменении требований, нагрузки и условий эксплуатации.

Разработана и реализована аналитическая платформа, обеспечивающая мониторинг системы управления и контроль критериев качества и надежности в режиме реального времени рассчитывает 20 показателей, описывающих состояние архитектуры системы управления. Эксперименты показали, что решение управленческих задач с использованием платформы позволяет сократить время анализа от 2,81 раза (для небольшого числа филиалов) до 17,72 раза (для развитой филиальной сети) по сравнению с ручным анализом.

Анализ устойчивости модели системы управления с использованием метода эквивалентных систем показал, что для получения нормального запаса устойчивости достаточно снизить частоту изменений в системе в 1,312 раза.

При оценке качества конфигурации системы управления показано, что на горизонте 2–4 кварталов значения U-коэффициента Тейла для основных показателей опускаются ниже единицы, что свидетельствует о превосходстве модели над наивным прогнозом, а значения $MASE < 1$ для части показателей, что указывает на более высокую точность по сравнению со средней исторической точностью. Количественная оценка качества конфигурации системы управления машиностроительным производством через величину ошибки агрегированных показателей, что позволяет выявлять конфигурации с устойчивым и адекватным поведением.

В совокупности результаты демонстрируют, что разработанные теоретические положения диссертации имеют практическую реализацию и верификацию на уровне реальной системы управления машиностроительным производством. Практическая значимость разработанных моделей и методов подтверждается их внедрением в деятельность ряда предприятий и организаций, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

В АО «Газпром автоматизация» результаты диссертации были использованы (Приложение М): при оценке цифровой зрелости информационной инфраструктуры одного из объектов управления; при проектировании конфигурации системы управления, основанной на холонической архитектуре; при внедрении аналитической платформы для мониторинга показателей защищенности и эффективности систем управления.

На основе разработанного метода оценки цифровой зрелости сформированы рекомендации по этапности внедрения холонической системы управления, приоритетам модернизации существующих информационных систем, настройке подсистем мониторинга и аналитической отчетности.

Модели архитектуры, СППР и аналитическая платформа были использованы для: формирования набора критериев качества и надежности; выбора конфигурации системы управления, учитывающей реальные ограничения по ресурсам и требованиям к времени отклика; организации регулярного контроля защищенности и эффективности.

В ООО «Орбита» результаты работы применены (Приложение Н): при разработке и тестировании аналитической платформы на базе Qlik Sense для задач мониторинга информационной безопасности и управления уязвимостями; при оптимизации интерфейсов и отчетных форм в соответствии с эргатическими критериями, полученными в диссертации.

Использованы методика формализации требований на основе текстов пользователей и регламентов, расчет 20 расчетных показателей для оценки защищенности, эффективности сканирования, управления активами и соответствия

стандартам. И проведен сравнительный анализ времени решения управленческих задач в ручном и автоматизированном режиме.

По данным пилотного проекта время решения типовых задач анализа инфраструктуры и управления уязвимостями сократилось в среднем в несколько раз (диапазон 2,81–17,72 раза в зависимости от масштаба объекта); повысилась полнота и регулярность контроля состояния информационной инфраструктуры.

В ООО «Генон» результаты диссертационной работы внедрены (Приложение П): при модернизации внутреннего уровня архитектуры системы управления, связанного с базами данных и SQL-запросами; при оптимизации стоимости и времени выполнения запросов в СУБД PostgreSQL на основе разработанной целевой функции и метода внутренней точки; при оценке и повышении надежности системы управления с учетом человеческого фактора. Практически применены модели нормализации и денормализации схем БД; расчет целевой функции стоимости запросов с параметрами (длина результата, фильтрация, RAM/DISK, время); даны рекомендации по структуре запросов, индексации, конфигурации памяти и мониторингу медленных запросов. Так же предложена модель надежности с учетом стрессовых показателей оператора, используемая для формирования требований к интерфейсу и режимам работы.

В акте внедрения отмечено, что использование результатов диссертационной работы позволяет оптимизировать архитектуру системы с учетом различных факторов человеческого влияния на функционирование. Методология, показанная в работе, позволила повысить эффективность работ, тем самым подтвердив правоту результатов диссертационного исследования. Процент внедрения на предприятии составил порядка 70%, что свидетельствует о широком охвате ключевых процессов и подсистем.

Таким образом, результаты диссертационной работы прошли апробацию и внедрение в реальных условиях эксплуатации систем управления и в ПАО «Газпром автоматизация», ОАО «Орбита» и ООО «Генон», что подтверждает их практическую значимость.

Так же научно-методические разработки, созданные автором, используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению. Внедрение результатов исследования подтверждено актом внедрения в учебный процесс (Приложение Р).

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

Для анализа функционирования системы управления машиностроительным производством в режиме реального времени разработано платформенное решение, который позволяет выявить перспективное направление в развитии технологий с использованием технологий B2E EAIP BI (внутрикорпоративная платформа интеграции разнородных данных на основе бизнес-интеллекта).

Определена практическая область деятельности – информационная безопасность, и ее наиболее актуальная в настоящий момент времени задача – управление уязвимостями и соответствия требованиям. Для этого были разработаны 20 расчетных показателей, с помощью которых удалось описать математическую модель визуализации данных.

Программная реализация эксперимента происходила на основе программного комплекса Qlik Sense, с помощью которого была развернута платформа, в который были автоматически интегрированы данные из системы анализа защищенности, и на основе расчетных показателей визуализированы. В качестве примера были определены следующие требующие решения управленческие задачи контроля защищенности системы управления машиностроительным производством: задача исследования исходных данных; инвентаризация информационных активов; динамика распространения уязвимостей; контроль эффективности; соответствие стандартам.

Исходя из полученных в результате проведения серии экспериментов практических результатов, можно сделать следующие выводы:

1. перевод результатов сканирования инфраструктуры системы управления машиностроительным производством в расчетные показатели количественных оценок, с их последующим применением действительно способствует оперативному принятию управленческих решений;

2. данный метод обладает высокой эффективностью, но именно в организациях с широко развитой филиальной сетью достигает максимальных значений;

3. при применении предлагаемого метода время принятия управленческих решений сокращается от 2,81 до 17,72 раза в отличие от методов ручного анализа, в зависимости от размеров филиальной сети организации.

Для анализа устойчивости архитектуры системы управления производством на практике использован метод эквивалентных систем, который позволяет оценить влияние связей на устойчивость как изменение передаточных функций разомкнутых систем независимых одномерных каналов или их частотных характеристик. Расчет показал, что для получения нормального запаса устойчивости достаточно снизить частоту вносимых изменений в 1,312 раз.

Приведение временных рядов к стационарному виду через дифференцирование и применение Med-MAD-преобразования обеспечило устойчивость расчетов к аномальным значениям и исключило риск формирования ошибочных выводов.

С использованием спектрального разложения в ряд Фурье и алгоритма Левенберга-Марквардта были построены модели, прогнозирующие значения отобранных показателей на краткосрочных период.

Качество построенных моделей оценивалось при помощи таких метрик, как MAPE, SMAPE, MASE и U-коэффициента Тейла. Было установлено, что данный метод эффективен для прогнозирования на горизонте от 2 до 4 кварталов. При этом значение $MASE < 1$ свидетельствует о том, что точность предлагаемой модели превосходит среднюю точность наивного метода прогнозирования.

Результаты и материалы проведенного исследования могут использоваться на практике для повышения эффективности при принятии управленческих решений.

Дальнейшее продолжение данной работы можно проводить в области автоматизации принятия управленческих решений, и автоматического анализа ключевых показателей эффективности в информационной безопасности на их основании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация цели и задач, сформулированных в рамках диссертационного исследования, позволила получить новые научно-обоснованные результаты и апробировать их при организации систем управления машиностроительным производством и повышения эффективности управления предприятием.

1. Обоснована необходимость разработки систем управления машиностроительным производством с применением различных методов исследования, основанных на разделах прикладной математики и информатики, и анализа влияния на управления различных принципов организации эталонных архитектур, отраженных в различных международных и российских стандартах, таких как: RAMI 4.0, IIRA, PERA, GERAM и CIMOSA, и производственных парадигм.

2. Разработана модель оценки цифровой зрелости машиностроительного производства с использованием методов автоматического сбора и анализа данных, учитывающая уровень текущей автоматизации процессов на предприятии на различных этапах жизненного цикла и иерархию процессов.

3. Использованы автоматизированные методы и алгоритмы нечеткого логического вывода для оценки критериев, описывающих функционально-технологические, производственные аспекты и когнитивные факторы человеко-машинного взаимодействия на внешнем и внутреннем уровне архитектуры системы управления производством, и методы комбинаторной оптимизации по Парето для выбора конфигурации СУ.

4. Проведено моделирование состояний во времени конфигураций СУ машиностроительным производством с расчетом вероятности безотказной работы на основе теории надежности для организации планового обслуживания элементов системы управления производством и снижения времени восстановления и затрат, связанных с простоями производства.

5. Формализована модель принятия решений и разработана система для выбора конфигурации архитектуры СУ машиностроительным производством

на внешнем, концептуальном и внутреннем уровне для сбора и анализа данных на макро и микромасштабе методами исследования эргатических функций, комбинаторной оптимизации, использованием точных и эвристических алгоритмов.

6. Проведена оценка критериев и организация компоновки элементов архитектуры СУ машиностроительным производством с использованием обобщенных методов нормализации данных и агрегирования показателей через корреляцию интеркритериев, основанной на реляционной модели данных, инструментов координации выполнения вычислительных задач при управлении жизненным циклом учетом человеко-машинного взаимодействия.

7. Разработана платформа для интерактивного анализа данных о состоянии СУ машиностроительным производством, который позволяет решать задачи инвентаризации и анализа информационных активов, изучения динамики надежности системы в режиме реального времени и повышения эффективности управления предприятием. Это комплексная система для сбора, хранения, консолидации и наглядной визуализации данных из различных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдикеев, Н. М. Управление знаниями корпорации и реинжиниринг бизнеса : учебник: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 080100 "Экономика" и экономическим специальностям / Н. М. Абдикеев. – Москва : ИНФРА-М, 2010. – 382 с. – ISBN 978-5-16-003829-2. – EDN QUIORT.
2. Аверченков В. И., Казаков Ю. М. АВТОМАТИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ В INTERNET //Инновационные недра Кузбасса. IT-технологии. – 2007. – С. 133-136.
3. Агиева, Н. Т. Модели управления на социальных сетях в маркетинге / Н. Т. Агиева // Инженерный вестник Дона: электронный журнал. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4670 (дата обращения: 29.05.2025).
4. Акулич М. Нейромаркетинг / М. Акулич. – М.: Инфра-М, 2018. – 242 с.
5. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000. 352 с.
6. Амаева Л. А. Сравнительный анализ методов интеллектуального анализа данных //Инновационная наука. – 2017. – №. 2-1. – С. 27-29.
7. Анализ коэффициентов корреляции показателей целей устойчивого развития / Д. А. Скворцова, Б. А. Швайко, Н. О. Романов, Н. А. Филин // Наука и бизнес: пути развития. – 2024. – № 12(162). – С. 48-51.
8. Антипова, А. С. Влияние социального предпринимательства на устойчивое развитие / А. С. Антипова // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея, Москва, 2024 год. – Москва: Издательский дом "Научная библиотека", 2024. – С. 83-84.

9. Аристов С. А. Многофункциональные имитационные системы поддержки принятия решений // Вестник Челябинского государственного университета. 2006. N 5. С. 40-44.
10. Афанасьева, В. А. Исследование применения многомерного анализа данных в транспортной логистике / В. А. Афанасьева, К. Д. Руденко, Д. А. Скворцова // Логистика. – 2024. – № 1(206). – С. 30-33. – EDN RAUNDX.
11. Багутдинов Р. А., Методы интеграции, уменьшение размеров и нормализация обработки разнородных и разномасштабных данных // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. N 2. С. 39-44.
12. Баканов А.С. Зеленова М. Е., Алдашева А.А. Когнитивные стили и эффективность работы с документацией // Сборник научных трудов SWorld. 2014. Вып. 2. Т. 15. С. 74–78.
13. Баканова Н.Б. Использование программно-технических комплексов для повышения эффективности контроля в системах документооборота //«Электросвязь». 2007. №6. С. 51–53.
14. Батенькина, О. В. Дизайн пользовательского интерфейса информационных систем : учеб. пособие / О. В. Батенькина; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 112 с.
15. Батищев, Д.И. Методы оптимального проектирования / Д.И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
16. Бородкин Ф. М., Айвазян С. А. Социальные индикаторы: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Статистика» и другим экономическим специальностям // ЮНИТИ-ДАНА. 2006. 607 с.
17. Бочкарев С. В., Цаплин А. И., Схиртладзе А. Г. Диагностика и надежность автоматизированных технологических систем: учеб. пособие для вузов / Бочкарев С. В., Цаплин А. И., Схиртладзе А. Г. - Старый Оскол : ТНТ, 2013. - 615 с. : ил. - Библиогр.: с. 584-586. - ISBN 978-5-94178-371-7.

18. Бржозовский Б. М., Мартынов В. В., Схиртладзе А. Г. Диагностика и надежность автоматизированных систем: учебник для вузов / Бржозовский Б. М., Мартынов В. В., Схиртладзе А. Г. - 4-е изд., стер. - Старый Оскол : ТНТ, 2013. - 351 с. : ил. - Библиогр.: с. 341-348.
19. Бром А.Е., Смирнов А.В. Моделирование выпуска продукции в условиях выполнения требований качества обработки и минимизации производственных затрат // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. - №5 (131). – С. 148-152.
20. Бром А.Е., Смирнов А.В. Планирование производственной программы с учетом требований качества в условиях нечетких ограничений // Контроль качества продукции. – 2023. - №5. – С. 56-60.
21. Вайнштейн, Л.А. Теория восприятия: курс лекций / Л.А. Ванштейн. – Мн.: БГУ, 2004. – 143 с.
22. Ватутин Э.И., Титов В.С. Параметрическая оптимизация алгоритма имитации отжига на примере решения поиска кратчайшего пути в графе // Технические науки. — 2015. — С. 13–16.
23. Величковский Б.М. Когнитивная наука: Основы психологии познания. В 2 т. Т. 1. М.: Смысл, 2006.
24. Волокобинский М. Ю., Пекарская О. А., Рази Д. А. Принятие решений на основе метода анализа иерархий // Финансы: теория и практика. 2016. N 2 (92). С. 33-42.
25. Волчкевич Л. И. Надежность автоматических линий / под ред. Г. А. Шаумяна. - М.: Машиностроение, 1969. - 307 с.
26. Галигузова Е. В., Илларионова Ю. Е. Сравнение реляционных и нереляционных СУБД // Символ науки. 2023. N 1-2. С. 14-17.
27. Гирин, И. А. Анализ методов оценки уровня цифровой зрелости промышленных предприятий / И. А. Гирин, Е. Н. Лобачева, Д. А. Скворцова // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 1(163). – С. 79-81.
28. Глотов А. А. Геоаналитика. Основа корпоративной геоинформационной инфраструктуры // Геоматика. 2015. N 3. С. 68-71.

29. Глущенко, Ф. А., Борzych, В., Верманн Дж., Коломбо, А. В. Разработка модели обучающей платформы для исследования процесса производства в концепции Индустрия 4.0 // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 554–560.

30. Голошубова О. М., Наумов В. Ю. Python: происхождение, преимущества и перспективы // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. N 1. С. 38-40.

31. ГОСТ Р 59799-2021 Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0) : дата введения 25.10.2021. – Москва: ГОСТ Р 59799-2021 Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0), 2021. – 29 с.

32. ГОСТ Р 59799-2021 Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0).

33. ГОСТ Р 71841-2024 (МЭК 62890:2020). «Цифровая промышленность. Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Управление жизненным циклом систем и компонентов»: нац. стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 29.11.2024 N 1808-ст // Кодекс: электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1310381179> (дата обращения: 12.01.2025)

34. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» (ISO 9000:2015 «Quality management systems - Fundamentals and vocabulary», IDT). Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2015 г. N 1390-ст. // Кодекс: электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124393> (дата обращения: 12.01.2025).

35. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 «Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов» (ISO/IEC

25010:2011 «Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models», IDT). Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 мая 2015 г. N 464-ст. // Кодекс: электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121069> (дата обращения: 12.01.2025).

36. ГОСТ Р МЭК 61512-1-2016. "Управление серийным производством. Часть 1. Модели и терминология" (IEC 61512-1:1997 "Batch control - Part 1: Models and terminology", IDT): нац. стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 октября 2016 г. N 1334-ст: ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ ПЕРЕИЗДАНИЕ. Апрель 2020 г. // Кодекс: электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140445> (дата обращения: 12.01.2025)

37. ГОСТ Р МЭК 61512-1—2016 Управление серийным производством. Часть 1. Модели и терминология.

38. ГОСТ Р МЭК 62264-1—2014 Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология.

39. Грибин М.А. Применение алгоритма Мамдани в системах автоматического управления // Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты: сборник статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей / Под общ. ред. Т.М. Сигитова. Пермь: Сигитов Т.М., 2017. С. 16-19;

40. Григорьев С.Н. Подход к построению информационно-вычислительных сред виртуальных производственных корпораций / Григорьев С. Н., Мартинова Л. И. // Межотраслевая информационная служба. – 2012. – №. 4. – С. 31-37.

41. Гринева Н. В., Топыркин А. Д. Геоаналитика: сбор, анализ и отображение географических данных для решения задач размещения коммерческих организаций // Инновации и инвестиции. 2023. N 5. С. 296-302.

42. Гринченков Д. В. и др. Сравнительный анализ алгоритмов интеллектуального анализа данных //ББК 22.18 в6 М 74. – 2016. – С. 263.
43. Гультияев, А. К. Проектирование и дизайн пользовательского интерфейса / А. К. Гультияев, В. А. Мишин. – СПб. : КОРОНА-Принт, 2000.
44. Дерябин А. В., Дерябин В. М. УГРОЗЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И УЯЗВИМОСТЬ АСУТП //Проектирование и технология электронных средств. – 2007. – №. 1. – С. 47-52.
45. Дилигенский Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. // М.: «Издательство Машиностроение – 1». – 2004.
46. Доклад Цифровая трансформация: эффекты и риски в новых условиях / Рук. авт. колл. П. Б. Рудник, Т. С. Зинина; под ред. И. Р. Агамирзяна, Л. М. Гохберга, Т. С. Зининой, П. Б. Рудника; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. – 156 с. – 150 экз.
47. Доклад. Цифровое производство: Методы, экосистемы, технологии. / П.Н. Биленко, Л.В. Лысенко, С.Л. Лысенко, И.С. Завалеев; Московская школа управления Сколково. 2019. – 47 с.
48. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. - 4-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1986.-479 с.
49. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. — М.: Наука, 1986. — 296 с.
50. Дудин, М. Н. Стратегическое видение экономического развития России в условиях технологического перехода от индустриального уклада (Индустрия 2.0 и 3.0) к Индустрии 4.0 / М. Н. Дудин, А. Н. Брынцев // Креативная экономика. – 2021. – Т. 15, № 3. – С. 783-804.
51. Дятчина, Е. В. Кибератаки как угроза безопасности промышленных предприятий: анализ потенциальных уязвимостей и методов защиты / Е. В. Дятчина // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 110-летию со дня рождения

академика В.Н. Челомея, Москва, 01–30 апреля 2024 года. – Москва: Издательский дом "Научная библиотека", 2024. – С. 102-103. – EDN LKZKHK.

52. Евсеев, Д. В. Применение технологий гибридного искусственного интеллекта для управления it-проектами / Д. В. Евсеев, Д. Э. Шихаматов // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея, Москва, 01–30 апреля 2024 года. – Москва: Издательский дом "Научная библиотека", 2024. – С. 103-104. – EDN GLNXRC.

53. Запечников С. В. и др. Информационная безопасность открытых систем: Учебник для вузов в 2-х томах. Том 1–Угрозы, уязвимости, атаки и подходы к защите // М.: Горячая линия–Телеком. – 2006.

54. Зернов, М. М. Алгоритм каскадного нечеткого логического вывода типа Мамдани / М. М. Зернов, Т. О. Зернова, Е. А. Панкратова // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2017. – Т. 2. – № 3(5). – С. 35-44. – EDN ZIPMFT;

55. Индустрия 4.0. [Электронный ресурс]: <http://holzex.ru/den-rozhdeniya-industrii-4-0-uzhe-sem-let/> (дата обращения 10.08.2023).

56. Инновационный маркетинг: учебник для бакалавриата и магистратуры / С. В. Карпова [и др.]; под ред. С. В. Карповой. — М.: Издательство Юрайт, 2017. – 457 с.

57. Измұханов, Е. А. Разработка нечеткой логики в среде MATLAB с применением пакета fuzzy logic Toolbox / Е. А. Измұханов // Инновационное развитие науки и образования: сборник статей X Международной научно-практической конференции, Пенза, 10 марта 2020 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 25-29. – EDN AWOVDD;

58. Канцедал С.А., Костикова М.В. Динамическое программирование для задачи коммивояжера // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. — 2014. — С. 15—20.

59. Карпенко А.П. Один класс прямых адаптивных методов многокритериальной оптимизации / А.П. Карпенко, В.Г. Федорук // Информационные технологии.- 2009.- №5.- С. 24-30.
60. Качанов С. А., Попов А. П. О месте аппаратно-программного комплекса "Безопасный город" в концепции "Умный город" // Технологии гражданской безопасности. – 2019. – Т. 16. – №. 3 (61). – С. 4-9.
61. Классификация информационных систем и информационных технологий [Электронный ресурс] – <https://studme.org/> (Дата обращения: 07.02.2024).
62. Ключникова Е. В., Шитова Е. М. Методические подходы к расчету интегрального показателя, методы ранжирования // ИнноЦентр. 2016. N 1. С. 4-18.
63. Короткая Н. В. Современные платформы VI: возможности и инструменты // Системы управления, информационные технологии и математическое моделирование. – 2022. – С. 179-184.
64. Костин К. В. Классификация систем поддержки принятия решений (СППР) // Научные исследования по приоритетным направлениям для создания инновационных технологий. 2020. С. 60-68.
65. Костюк Ю.Л. Задача коммивояжера: улучшенная нижняя граница в методе ветвей и границ // Прикладная дискретная математика. – 2013. – № 4 (22). – С. 73-82.
66. Костюк Ю.Л. Эффективная реализация алгоритма решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ // Прикладная дискретная математика. – 2013. – № 2 (20). – С. 78-80.
67. Кочеганов, Д. М. Система оценки качества функционирования преобразователя частоты с использованием нечеткой логики / Д. М. Кочеганов, А. В. Серебряков // Интеллектуальная электротехника. – 2019. – № 4. – С. 27-34. – DOI 10.46960/2658-6754_2019_4_27. – EDN DXSNPL;
68. Краковская, И. Н. Об оценке цифровой зрелости, готовности и рисков цифровой трансформации предприятий / И. Н. Краковская // Эффективное

управление экономикой: проблемы и перспективы : Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Симферополь, 13–14 апреля 2023 года / Научн. ред. В.М. Ячменевой, редколлегия: М.В. Высочина, А.А. Антонова, Р.А. Тимаев. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2023. – С. 302-305.

69. Кремер О. Б., Подвальный С.Л. Программная реализация решения оптимизационных задач методом генетического алгоритма // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – С. 21-24.

70. Кульмамиров, С. А. Процесс настройки нечеткого логического вывода по алгоритму Мамдани / С. А. Кульмамиров, А. М. Аузбаева // Синергия Наук. – 2020. – № 54. – С. 954-968. – EDN XCROHS;

71. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – С. 30-36.

72. Курило А. П. и др. Основы управления информационной безопасностью. Учебное пособие. – 2012.

73. Лоскутов, И. А. Динамическое нормирование с использованием метода агентного моделирования процесса сборки оборудования для атомных электростанций / И. А. Лоскутов, Д. А. Скворцова, В. Г. Искандарова // Омский научный вестник. – 2023. – № 1(185). – С. 46-52. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-185-46-52. – EDN KEAOAC.

74. Магеррамов П. А. Разработка методики автоматизации комплексного бизнес-анализа для организаций МСБ на базе MS POWER BI / Л. В. Силакова, П. А. Магеррамов, М. А. Семкина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2019. – № 3. – С. 101-108. – DOI 10.17586/2310-1172-2019-12-3-101-108. – EDN YMEAPD.

75. Магеррамов П. А. Новые методы анализа и прогнозирования данных через визуализацию данных //Назвитие финансовых отношений в период становления цифровой экономики. – 2019. – С. 408-411.

76. Макарова И. Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья // Символ науки. 2015. N 7-1. С. 87-95.

77. Малафеев С. И., Копейкин А. И. Надежность технических систем. Примеры и задачи: учеб. пособие для вузов / Малафеев С. И., Копейкин А. И. - СПб.: Лань, 2012. - 313 с.: ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 307-310. - ISBN 978-5-8114-1268-6.

78. Маруцак, Л. И. Обработка данных, измеренных в шкале Лайкерта, с помощью теории нечетких множеств / Л. И. Маруцак // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине : Сборник научных трудов II Международной конференции, Томск, 19–22 мая 2015 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – С. 880-881. – EDN ULJSXD;

79. Махмадиев, Б. С. Компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/Simulink / Б. С. Махмадиев, С. Н. Хусанов // Вестник Науки и Творчества. – 2017. – № 4(16). – С. 26-32. – EDN YNCWBH;

80. Медведев Ю. С., Терехов В. В. Повышение производительности базы данных инструментами СУБД Oracle // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2018. – №. 9. – С. 32-34.

81. Методы анализа и оценки показателей целей устойчивого развития / Д. А. Скворцова, А. А. Кузнецов, Б. А. Швайко, Н. О. Романов // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 12(150). – С. 215-218. – EDN PFCCIX.

82. Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием / П. А. Лонcich, Е. Ю. Головина, Н. П. Лонcich, И. И. Лившиц // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 2. – С. 170-180.

83. Моделирование рисков малого машиностроительного предприятия в процессе диверсификации / В. Ю. Рогов, П. А. Лонcich, О. М. Сафонова,

А. Е. Пашков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 220-227.

84. Морозова О. А. Интеграция корпоративных информационных систем // М.: Финансовый университет. – 2014.

85. Надежность информационных систем Лабораторный практикум / Громов Ю.Ю., Дидрих И.В., Иванова О.Г., Паладьев В.В., Яковлев А.В. - 2015. - URL: <http://www.iprbookshop.ru/64125.html>.

86. Нечаев, Д. Ю. Надежность информационных систем : учебное пособие / Д. Ю. Нечаев, Ю. В. Чекмарев. — Москва : ДМК Пресс, 2012. — 64 с. — ISBN 978-5-94074-566-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/3030>

87. Никулин В. Н., Канищев И. С., Багаев И. В. Методы балансировки и нормализации данных для улучшения качества классификации // Компьютерные инструменты в образовании. 2016. N 3. С. 16-24.

88. Обзор методов нормализации критериев устойчивого развития / Б. А. Швайко, Д. А. Скворцова, А. А. Кузнецов, Н. О. Романов // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 12(150). – С. 44-47. – EDN YDVZHL.

89. Обзор методов нормализации критериев устойчивого развития / Б. А. Швайко, Д. А. Скворцова, А. А. Кузнецов, Н. О. Романов // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 12(150). – С. 44-47. – EDN YDVZHL.

90. Оганян Р. Г., Саенко Г. И. Краткая характеристика технологии больших данных и возможности применения данной технологии // Информационные и измерительные системы и технологии. – 2016. – С. 18-21.

91. Оптимизация маршрута беспилотных аппаратов при использовании на складе с использованием генетических алгоритмов / Д. Скворцова, А. Федина, В. Кульбацкая // Логистика. – 2021. – № 6(175). – С. 16-19.

92. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов / Острейковский В. А. - М.: Высш. шк., 2003. - 462 с.: ил. - Библиогр.: с. 457.

93. Пак В. В. VI-инструменты как база построения эффективной системы внутренней отчетности // Бухгалтерский учет, анализ и аудит: история, современность и перспективы развития. – 2019. – С. 239-242.
94. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / Издательский дом «Астраханский университет». 2007. 87 с.
95. Пищухина Т.А. Применение искусственного интеллекта и бионического подхода для проектирования реконфигурируемой производственной системы (РПС) / Пищухина Т.А., Ахмедьянова Г.Ф. // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологий: сборник материалов IX Всероссийской конференции с международным участием. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. – С. 287-291.
96. Плотников В. А. Цифровизация производства: теоретическая сущность и перспективы развития в российской экономике // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2018. – №. 4 (112). – С. 16-24.
97. Подшивалов С.Ф., Подшивалова К.С., Левицкая Л.В., Дунаев С.В. Совершенствование алгоритма метода ветвей и границ в задаче коммивояжера для автомобильного транспортного графа // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1. – С. 169-179.
98. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности: учеб. пособие для вузов / Половко А. М., Гуров С. В. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : БХВ-Петербург, 2006. - 702 с. - Библиогр.: с. 689-698. - ISBN 5-94157-541-6.
99. Прокопенко Н. Ю. Системы поддержки принятия решений: учеб. пособие / ННГАСУ. 2017. 188 с.
100. Пустовалова Е. А., Чернов В. П. Сравнительный анализ методов размещения точки розничной сети // Современная экономика. 2015. N 2 (62). С. 29-44.
101. Пушкарева М.Б. Инновационные парадигмы управления промышленной организацией в современной экономической ситуации // Научные

труды Вольного экономического общества России. – М.: ООО «ВЭО России», 2011. С. 34-347.

102. Пылов П. А., Протодяконов А. В. Масштабирование и нормализация как основа Data Cleaning // Инновации. Наука. Образование. 2020. N 23. С. 225-232.

103. Разработка гибридной имитационной модели сборочного цеха / Д. А. Скворцова, Е. Л. Чувильгин, А. В. Смирнов, Н. О. Романов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15, № 5. – С. 1359-1379.

104. Риск-ориентированное мышление стандарта ISO 9001:2015 - новые методы, подходы и инструменты риск-менеджмента / А. Я. Езрахович, А. В. Владимирцев, П. А. Лонcich [и др.] // Качество. Инновации. Образование. – 2017. – № 6(145). – С. 22-33. – EDN ZNGUWX.

105. Руденко, К. Д. Прогнозирование в логистических системах с использованием функции Linlin / К. Д. Руденко // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова, Москва, 01–30 апреля 2023 года. – Москва: Издательский дом "Научная библиотека", 2023. – С. 141-142. – EDN CPGADP.

106. Руденко, К. Д. Сверточные нейронные сети: современный подход к анализу изображений и обработке данных / К. Д. Руденко // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея, Москва, 01–30 апреля 2024 года. – Москва: Издательский дом "Научная библиотека", 2024. – С. 128-130. – EDN QCZOQE.

107. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий // Радио и связь. 1993. 278 с.

108. Сафонова, О. М. Разработка модели управления рисками в системах менеджмента качества информационной безопасности / О. М. Сафонова, П. А. Лонcich // СМИС-2024. Технологии управления качеством: Материалы Международной научно-технической конференции, Москва, 22–24 мая 2024 года. – Москва: Московский Политех, 2024. – С. 512-519. – EDN LTGZBJ.

109. Северцев Н. А. Статистическая теория подобия: надежность технических систем. - Москва: Наука, 1986. - 204 с.
110. Семенов В. А., Семенова М. М., Мызникова Л. В. Анализ методов и задач интеллектуального анализа данных // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2021). – 2021. – С. 209-212.
111. Семенов С. С. Программа для решения задачи коммивояжера с помощью муравьиного алгоритма / Семенов С. С., Ткачев Д. Ф., Педан А. В., Алисевич Е. А., Попов А. В., Воронцов О. С., Киселев Д. В., Климов И. С // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2016. – № 6. – С. 31.
112. Скворцов, А. В. Представление по ГОСТ 2.053-2006 электронных структур изделий в среде реляционных баз данных / А. В. Скворцов, Д. А. Скворцова, Д. А. Чмырь // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. – № 1(67). – С. 30-38. – EDN KYWECR.
113. Скворцов, А. В. Статистическое моделирование векторных и скалярно-векторных размерных цепей / А. В. Скворцов, Д. А. Скворцова, Д. А. Чмырь // Вестник машиностроения. – 2008. – № 2. – С. 17-20. – EDN IJNYRX.
114. Скворцова Д.А. Архитектура холонической производственной системы / А.А. Федина, Д.А. Скворцова // Автоматизация в промышленности. 2023. № 8. С. 8 – 13.
115. Скворцова Д.А. Системный подход к проектированию распределенных нанотехнологических производственных систем / С. И. Ветров, В. С. Горохов, А. В. Скворцов [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 11(112). – С. 17-26. – EDN KXNNRN.
116. Скворцова Д.А., Романов Н.О. Разработка стратегии развития и внедрения инноваций на промышленных предприятиях. // Управление устойчивым развитием. - 2023. - №1. - С. 29-38.
117. Скворцова, Д. А. Анализ политик динамического нормирования запасов / Д. А. Скворцова, Ю. А. Бабаева, А. Мармулев // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 6(132). – С. 75-78. – EDN IYXXBG.

118. Скворцова, Д. А. Аналитическое представление обобщенного множества критериев устойчивого развития с использованием теории графов / Д. А. Скворцова, Н. О. Романов, Н. А. Филин // Research Forum - 2024 : Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 07 марта 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 65-71.

119. Скворцова, Д. А. Использование многомерных OLAP-кубов, как инструмента Business Intelligence, при стратегическом управлении бизнес процессами компании / Д. А. Скворцова, Д. А. Чмырь // Экономика: теория и практика. – 2016. – № 3(43). – С. 70-77. – EDN WWDFBB.

120. Скворцова, Д. А. Компьютерные и интеллектуальные системы в логистике / Д. А. Скворцова. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 40 с. – ISBN 978-5-7038-6026-7. – EDN OUCRJV.

121. Скворцова, Д. А. Компьютерные и интеллектуальные системы в логистике / Д. А. Скворцова. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 40 с. – ISBN 978-5-7038-6027-4. – EDN RXQDBS.

122. Скворцова, Д. А. Конструкторско-технологические аспекты массового производства (сборки) персональных компьютеров (ПК) / Д. А. Скворцова, А. В. Скворцов // Сбор в машиностроении, приборостроении. – 2005. – №2. – С. 14-22.

123. Скворцова, Д. А. Моделирование процессов сборки электронных устройств для проектирования гибких автоматизированных производственных систем / Д. А. Скворцова - Конференция "Business English in the Business World": сборник статей. Издательский дом Высшей школы экономики. Г. Москва, 2007 - С. 27 - 29.

124. Скворцова, Д. А. Моделирование технологических процессов сборки электронной аппаратуры при проектировании гибких автоматизированных производственных систем / Д. А. Скворцова - IV Международная научно-техническая конференция «Материалы и технологии XXI века» (МК-

50-96): сборник статей НОУ «Приволжский Дом знаний». Г. Пенза, 2006. - С. 272 – 273.

125. Скворцова, Д. А. Обзор задач и критериев для достижения целей устойчивого развития / Д. А. Скворцова, Н. О. Романов, Н. А. Филин // Инновационный вектор развития современной науки: Сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 07 марта 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 177-180. – EDN AMKBVM.

126. Скворцова, Д. А. Обоснование необходимости организации эффективного высокотехнологичного отечественного производства / Д. А. Скворцова, Н. О. Романов // Управление устойчивым развитием. – 2023. – № 1(44). – С. 29-38. – DOI 10.55421/2499992X_2023_1_29. – EDN CNWXRK.

127. Скворцова, Д. А. Особенности информационной системы управления логистикой на дворовой территории / Д. А. Скворцова, Е. В. Ершова, М. М. Флигиль // Логистика. – 2023. – № 5(198). – С. 28-32. – DOI 10.54959/22197222_2023_05_28. – EDN VIELRM.

128. Скворцова, Д. А. Особенности организации интеллектуальных производственных систем / Д. А. Скворцова, Е. В. Ершова // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 3(129). – С. 92-94. – EDN PWZMMJ.

129. Скворцова, Д. А. Применение нейромаркетинговых технологий при разработке и анализе информационных систем / Д. А. Скворцова, Ю. С. Савинова, А. К. Алмырзаева // Практический маркетинг. – 2020. – № 5(279). – С. 3-9. – DOI 10.24411/2071-3762-2020-10023. – EDN YTGMEZ.

130. Скворцова, Д. А. Принципы создания гибких производственных систем автоматизированной сборки / Д. А. Скворцова, А. В. Скворцов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2006. – № 1. – С. 52-59.

131. Скворцова, Д. А. Прогнозирование выручки инновационного продукта ГК "Росатом" - сбалансированный ядерный топливный цикл / Д. А. Скворцова, А. Д. Ильин, К. А. Солониченко // Научные труды: Институт

народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 153-170. – DOI 10.47711/2076-3182-2024-1-153-170. – EDN QFPEKX.

132. Скворцова, Д. А. Решение задач ресурсосбережения с помощью инструментов линейного программирования / Д. А. Скворцова, Е. Л. Чувильгин, И. С. Деркач // Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование: Материалы конференции, Москва, 18 июня 2021 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2021. – С. 432-437. – EDN VGBYUK.

133. Скворцова, Д. А. Современные методы управления в транспортной логистике / Д. А. Скворцова, К. Д. Руденко // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 11(149). – С. 49-53. – EDN QGXLOP.

134. Скворцова, Д. А. Статистическое моделирование производственных процессов гибкой автоматизированной сборки в среде объектно-ориентированного программирования / Д. А. Скворцова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 289-300. – EDN SARXLE.

135. Скворцова, Д. А. Технологические проблемы массового производства (сборки) персональных компьютеров / Д. А. Скворцова, А. В. Скворцов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. - №8. – С. 16-19.

136. Скворцова, Д. А. Эталонная архитектура RAMI 4.0 / Д. А. Скворцова, Е. Е. Васильева // Перспективы науки. – 2024. – № 1(172). – С. 82-84.

137. Скворцова, Д. Развитие интеллектуальной системы мониторинга и сбора отходов с использованием технологий Интернета вещей и эволюционных алгоритмов / Д. Скворцова, А. Алмырзаева, Ю. Савинова // Логистика. – 2020. – № 6(163). – С. 35-37. – EDN SOUBWV.

138. Скворцова, Д. Современные тенденции развития технологий Индустрии 4.0 при управлении цепями поставок / Д. Скворцова, О. Зобнина, А. Дю // Логистика. – 2022. – № 1(182). – С. 32-36. – EDN ZUDDXB.

139. Скворцова, Д.А. Системный подход к проектированию виртуальных производств в среде CALS-технологий. / Чмырь Д.А., Ветров С.И., Ковшов А.Н. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2009. - №12. - С. 59-64.
140. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для холонических предприятий // Штучный интеллект. – 2001. – №. 3. – С. 107-109.
141. Слесаренко, Г. В. Необходимость внедрения цифровых паспортов промышленных предприятий // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2023. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neobhodimost-vnedreniya-tsifrovyyh-pasportov-promyshlennyh-predpriyatiy> (дата обращения: 25.05.2025).
142. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981.
143. Солонько М. К., Краснов К. А. Docker-контейнеры // Телекоммуникации и информационные технологии. 2020. Т. 7. N 1. С. 65-69.
144. Стадник Н.А., Хайбуллин Ш.Д. Решение задачи коммивояжера с использованием алгоритма имитации отжига // Информационные системы и технологии. — 2019. С. 431—436.
145. Судов, Е.В. Анализ логистической поддержки: теория и практика. / Е.В. Судов, А.И. Левин, А.Н. Петров, А.В. Петров, Д.Н. Бороздин - Москва: ООО Издательский дом «Информ- Бюро», 2014. - 260 с.
146. Судов, Е.В. Анализ логистической поддержки: теория и практика. / Е.В. Судов, А.И. Левин, А.Н. Петров, А.В. Петров, Д.Н. Бороздин - Москва: ООО Издательский дом «Информ- Бюро», 2014. - 260 с.
147. Сумин В. И. и др. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПИСАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: сборник материалов. – 2014. – С. 168.
148. Таха Х. А. Введение в исследование операций, 7-е издание // Издательский дом "Вильямс". 2005. 912 с.

149. Тельнов А.Ф. Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для создания сетевых предприятий. М.: Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова. 2022. №4. С. 557-571. [Электронный ресурс]: <http://swsys.ru/> (дата обращения 20.09.2023).

150. Титова Н. В. Распознавание данных в больших системах с нечеткими, неполными и противоречивыми входными данными //Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 2013. – Т. 1. – С. 148-150.

151. Товстик Т.М., Жукова Е.В. Алгоритм приближенного решения задачи коммивояжера // Вестник СПбГУ — 2013. — С. 101—109.

152. Трусфус, М. В. Моделирование в системе структурного и имитационного моделирования Simulink / М. В. Трусфус, А. П. Кирпичников, // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 8. – С. 107-110.

153. Труханов В. М. Надежность в технике = Reliability in TECHNIQUE / Труханов В. М. - М.: Машиностроение, 1999. - 597 с.: ил. - Библиогр.: с. 588-590. - ISBN 5-217-02916-1.

154. Туровец Ю.В., Вишневский К.О. Стандартизация цифрового производства: возможности для России и ЕАЭС // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 3. С. 78–96. [Электронный ресурс]: <https://bijournal.hse.ru/data/2019/10/22/6.pdf> (дата обращения 20.08.2023).

155. Федина А. А., Нургалиев А. И., Скворцова Д. А. Сравнение результатов применения различных эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимизации маршрута беспилотных аппаратов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022 – Т. 14 № 1 – С. 45–62.

156. Фомичев М.И. Сравнительный анализ метаэвристических алгоритмов решения несимметричной задачи коммивояжера // Информационные системы и технологии ИСТ-2017. — 2017. — С. 770—774.

157. Хабиб Т. Ж. М., Погуда А. А. Метод визуализации данных как способ представления информации //ИННОВАТИКА-2022. – 2022. – С. 162-165.

158. Хабиб, Т. Ж. М. Разработка интеллектуальной системы обработки слабоструктурированных данных с алгоритмом структуризации по отраслям / Т. Ж. М. Хабиб, А. А. Погуда // Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции: сборник материалов IV Международного форума, Томск, 15–16 декабря 2021 года. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2022. – С. 60-61. – EDN MEFAZS.

159. Хасанов, Т. А. Развитие Интернета вещей и его роль в современной логистике / Т. А. Хасанов, Д. А. Скворцова, Б. А. Эдаев // Наука и бизнес: пути развития. – 2024. – № 5(155). – С. 113-117. – EDN IRNXCA.

160. Хасанов, Т. А. Структура базы данных для системы по мониторингу состояния складского оборудования на базе технологии Интернета вещей / Т. А. Хасанов // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея, Москва, 01–30 апреля 2024 года. – Москва: Издательский дом "Научная библиотека", 2024. – С. 135-136. – EDN LANGXU.

161. Цгоева Н.А. Применение метода динамического программирования для решения задачи коммивояжера // Инновации. Наука. Образование. — 2021.

162. Цифровой двойник. Digital Twin of Organization, DTO. [Электронный ресурс]: <https://www.tadviser.ru/index.php> (Digital_Twin_of_Organization,_DTO) (дата обращения 15.08.2023).

163. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие для вузов / Черкесов Г. Н. - СПб. : Питер, 2005. - 478 с.: ил. - (Учеб. пособие). - Библиогр. в конце гл. - ISBN 5-469-00102-4.

164. Чмырь Д.А. Оптимизация технологических процессов генетическими алгоритмами. – М.: Изд-во AP LAMBERT Academic Publishing. – 2018. – 52 с.

165. Шабанова Н. Ю., Ефремова О. А., Шарапов А. Р. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВИ-РЕШЕНИЙ //Проблемы науки. – 2019. – С. 214-218.
166. Шкарупета Е. В. Фрактальные организации в условиях экономики знаний / Шкарупета Е. В., Смышляев В. А. // Вестник ВГТУ. – 2012. – №7-1. – С. 14-17.
167. Шмелева С. А. Большие данные в процессе принятия решений: от анализа теорий к оценке эффективности практик //Вестник Пермского университета. Серия: Политология. – 2021. – Т. 15. – №. 3. – С. 40-51.
168. Шостак Р. К., Лепешкин О. М. Актуальность развития сетевого контроля защищенности информационных систем //Региональная информатика и информационная безопасность. – 2017. – С. 190-192.
169. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с., ил.;
170. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер.– М.: Радио и связь, 1992.- 504 с.
171. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза / Шубинский И. Б. - Ульяновск: ООО "Журнал "Надежность", 2016. - 544 с.: ил. - Библиогр.: с. 526-538.
172. Шубинский И. Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа / Шубинский И. Б. - Ульяновск: ООО "Журнал "Надежность", 2012. - 213 с.: ил. - Библиогр.: с. 210-213. - ISBN 978-5-7572-0326-3.
173. Шубинский И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / Шубинский И. Б. - Ульяновск: ООО "Журнал "Надежность", 2012. - 295 с.: ил. - Библиогр.: с. 286-292.
174. Щапов В. А., Денисов А. В., Латыпов С. Р. Применение контейнерной виртуализации Docker для запуска задач на суперкомпьютере // Суперкомпьютерные дни в России 2016. 2016. С. 505-511.

175. Эталонные архитектуры цифрового производства. Их роль в формировании системы управления бизнес-процессами предприятия / Третьяченко Т. В., Быкадоров Н. А. и др. // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2025. – Т. 32. – №. 3. – С. 46-65.

176. Эталонная архитектурная модель интернета вещей. [Электронный ресурс]: <https://www.efficientplantmag.com> (дата обращения 15.08.2023).

177. Эталонная архитектурная модель RAMI 4.0 для Industrie 4.0. [Электронный ресурс]: <https://www.isa.org> (дата обращения 10.08.2023).

178. Ягшыев Я. и др. разработка интеллектуальных систем управления для оптимизации производственных процессов в индустрии 4.0 // научный журнал «ЕО IPSO». – С. 14.

179. Ян Я., Трейман М. Г., Бизнес-экосистемы в эпоху цифровых технологий // Управленческий учет. – 2022. – №. 5. – С. 253-258.

180. Ямалеева Г. Н., Перухин М. Ю., Гибадуллин Р. Ф. Оптимизация исполнения SQL-запросов к базам данных под управлением MySQL // Информационные технологии и математическое моделирование – 2017. – С. 239-241.

181. Яхьяев Н. Я., Кораблин А. В. Основы теории надежности: учебник для вузов / Яхьяев Н. Я., Кораблин А. В. - 2-е изд., перераб. - М. : Академия, 2014. - 207 с. : ил. - (Высшее профессиональное образование. Транспорт) (Бакалавриат). - Библиогр.: с. 205. - ISBN 978-5-7695-9871-5.

182. Яхьяев, Н. Я. Безопасность транспортных средств : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Организация и безопасность движения (Автомобильный транспорт)" направления подготовки "Организация перевозок и управления на транспорте" / Н. Я. Яхьяев ; Н. Я. Яхьяев. – Москва : Академия, 2011. – (Высшее профессиональное образование. Транспорт). – ISBN 978-5-7695-6825-1. – EDN OWXLRL.

183. Abou Zeidan T. M., Rempel M. GeoHexViz: A Python package for the visualizing hexagonally binned geospatial data // Journal of Open Source Software. 2023. Vol. 8. No. 82. 5073 p.

184. Agatz N., Bouman P., Schmidt M. Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone // *Transportation Science*. – 2018. – Vol. 52. – No. 4. – P. 965-981.
185. Alfnes, E. et al. Advances in Production Management Systems // *Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures: IFIP WG 5.7 International Conference*. – 2023. – T. 690.
186. Anandarajan M., Anandarajan A., Srinivasan C. A. Business intelligence techniques: a perspective from accounting and finance. – Springer Science & Business Media, 2004.
187. Azeroual O., Theel H. The effects of using business intelligence systems on an excellence management and decision-making process by start-up companies: A case study // *arXiv preprint arXiv:1901.10555*. – 2019.
188. Bellman R. Dynamic programming treatment of the travelling salesman problem // *Journal of the ACM (JACM)* — 1962.
189. Benbya H., Passiante G., Belbaly N. A. Corporate portal: a tool for knowledge management synchronization // *International journal of information management*. – 2004. – T. 24. – №. 3. – C. 201-220.
190. Bernus P., Noran O. Enterprise architecture: Twenty years of the GERAM framework // *Annual Reviews in Control*. – 2015. – T. 39. – C. 83-93.
191. Berson A., Smith S. J. Data warehousing, data mining, and OLAP // McGraw-Hill. 1997.
192. Binder C. Introduction to the „RAMI 4.0 Toolbox “ // *vol.* – 2020. – T. 43. – C. 1-27.
193. Bongaerts L. Identification of manufacturing holons / Bongaerts L., Wyns J., Detand J., Van Brussel H., Valckenaers P. // *Proceedings of the European Workshop on Agent-Oriented Systems in Manufacturing*. – 1996. – P. 47-73.
194. Borangiu T. et al. Holonic hybrid supervised control of semi-continuous radiopharmaceutical production processes // *Advanced Control Techniques in Complex Engineering Systems: Theory and Applications: Dedicated to Professor Vsevolod M. Kuntsevich*. – 2019. – C. 229-258.

195. Borglund E. A predictive model for attaining quality in recordkeeping : дис. – Mid Sweden University, 2006.
196. Borglund E. Electronic record quality, necessary inter alia for trustworthy e-government services //4th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2005; Lisbon; Portugal; 5 July 2005 through 7 July 2005; Code 106100. – 2005. – Т. 1. – С. 334-341.
197. Borglund E., Öberg L. M. Operational use of records //Proceedings of IRIS. – 2006. – Т. 29. – С. 12-15.
198. Bousdekis A., Lepenioti K., Ntalaperas D., Vergeti D., Apostolou D., Boursinos V. «A RAMI 4.0 view of predictive maintenance: software architecture, platform and case study in steel industry». 2019. [Электронный ресурс]: URL: <https://link.springer.com/> (дата обращения 12.09.2023).
199. Branke J., Guntsch M. Solving the probabilistic TSP with ant colony optimization // Journal of Mathematical Modelling and Algorithms. – 2004. – P. 403–425.
200. Brueckner S. MASCADA: Manufacturing control systems capable of managing production change and disturbances //Newsletter of AgentLink (The European Network of Excellence for Agent-Based Computing). – 1998. – Т. 1. – №. 1. – С. 16-19.
201. Buckhorst A. F. Decentralized Holonic Control System Model for Lineless Mobile Assembly Systems / Buckhorst A. F., Grahn L., Schmitt R. H. // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2022. – V. 75. – P. 1-15.
202. Buckland M. K. Information as thing //Journal of the American Society for information science. – 1991. – Т. 42. – №. 5. – С. 351-360.
203. Chang H. H., Wang I. C. Enterprise Information Portals in support of business process, design teams and collaborative commerce performance //International Journal of Information Management. – 2011. – Т. 31. – №. 2. – С. 171-182.
204. Chauhan C., Gupta R., Pathak K. Survey of methods of solving tsp along with its implementation using dynamic programming approach // International Journal of Computer Applications. — 2012. — Vol. 5, No.4. — P. 12—19.

205. Checkland P., Poulter J. Soft systems methodology //Systems approaches to making change: A practical guide. – 2020. – С. 201-253.
206. Checkland P., Scholes J. Soft systems methodology in action John Wiley & Sons //Inc, New York. – 1990.
207. Checkland P., Scholes J. Soft systems methodology in action. – John Wiley & Sons, 1999.
208. Codd E. F. Providing OLAP (on-line analytical processing) to user-analysts: An IT mandate //http://www.arborsoft.com/papers/coddTOC.html. – 1993.
209. De Mauro, A., Greco, M. and Grimaldi, M. A formal definition of Big Data based on its essential features. Library Review, 2016. Vol. 65. № 3. P. 122-135. [Электронный ресурс]: <https://doi.org/> (дата обращения 12.08.2023).
210. DeLone W. H., McLean E. R. Information systems success: The quest for the dependent variable //Information systems research. – 1992. – Т. 3. – №. 1. – С. 60-95
211. DeLone W. H., McLean E. R. Information systems success: The quest for the dependent variable //Information systems research. – 1992. – Т. 3. – №. 1. – С. 60-95.
212. DeLone W. H., McLean E. R. The DeLone and McLean model of information systems success: a ten-year update //Journal of management information systems. – 2003. – Т. 19. – №. 4. – С. 9-30.
213. Diakoulaki D., Mavrotas G., Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method // Computers & Operations Research. 1995. Vol. 22. No. 7. P. 763-770.
214. Digital Maturity Assessment. BDC [Электронный ресурс], - Режим доступа: <https://www.bdc.ca> (дата обращения: 25.05.2025).
215. Digital Maturity benchmark. Google and BCG [Электронный ресурс], - Режим доступа: <https://digitalmaturitybenchmark.withgoogle.com> (дата обращения: 25.05.2025)

216. Dilts D. M. The evolution of control architectures for automated manufacturing systems / Dilts D. M., Boyd N. P., Whorms H. H. // Journal of manufacturing systems. – 1991. – V. 10. – №. 1. – P. 79-93.
217. DKE German Commission for Electrical, Electronic & Information Technologies in DIN and VDE: офиц. сайт. Оффенбах-ам-Майн. URL: <https://www.dke.de/en/> (дата обращения: 25.05.2005).
218. Dorigo M., Member S. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem // IEEE transactions on evolutionary computation. – 1997. – Vol. 1. – No. 1. – P. 53-66.
219. Douglas K., Douglas S. PostgreSQL: a comprehensive guide to building, programming, and administering PostgreSQL databases // SAMS publishing. 2003.
220. Douglas K., Douglas S. PostgreSQL (Developer's Library) // Pearson Education (US). ISBN. – 2003. – Т. 501. – С. 9780735712577.
221. Duffie N. A., Chitturi R., Mou J. I. Fault-tolerant heterarchical control of heterogeneous manufacturing system entities // Journal of Manufacturing Systems. – 1988. – V. 7. – №. 4. – P. 315-328.
222. Duffie N. A., Prabhu V. V. Real-time distributed scheduling of heterarchical manufacturing systems // Journal of Manufacturing Systems. – 1994. – V. 13. – №. 2. – P. 94-107.
223. EDA и SOA интеграция и практика. [Электронный ресурс]: <https://russianblogs.com/article/1126250830/> (дата обращения 12.09.2023).
224. El-Sappagh S. H. A., Hendawi A. M. A., El Bastawissy A. H. A proposed model for data warehouse ETL processes // Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. 2011. Vol. 23. No. 2. P. 91-104.
225. Enterprise Integration Standards // https://www.pera.net/Ind_stds.html [сайт]. URL: https://www.pera.net/Ind_stds.html (дата обращения: 25.05.2025).
226. Espejo R., Harnden R. The viable system model // Systems practice. – 1990. – Т. 3. – №. 3. – С. 219-221.

227. Flood R. L., Carson E. R. Dealing with complexity: an introduction to the theory and application of systems science. – Springer Science & Business Media, 2013.
228. Fortheringham A. S. A New Set of Spatial Interaction Models: The Theory of Competing Destinations // Environment and Planning. 1983. No. 15. P. 15-36.
229. Gautschi D. A. Specification of Patronage Models for Retail Center Choice // Journal of Marketing Research. 1981. No. 18. P. 162-174.
230. Greco F. Traveling Salesman Problem. – InTech. – 2008. – 212 p.
231. Guntch M., Middendorf M., Schmeck H. An ant colony optimization approach to dynamic TSP // Proceedings of the 3rd annual conference on Research in information technology. – 2001. – P. 860-867.
232. Han S. A review of smart manufacturing reference models based on the skeleton meta-model // Journal of Computational Design and Engineering. – 2020. – Т. 7. – №. 3. – С. 323-336.
233. Hand D. J., Adams N. M. Data mining. 2014. [Электронный ресурс]: URL: <https://onlinelibrary.wiley.com> (дата обращения 12.09.2023).
234. Hatvany J. Intelligence and cooperation in heterarchic manufacturing systems // Robotics and computer-integrated manufacturing. – 1985. – V. 2. – №. 2. – P. 101-104.
235. IEC 62243-2012 Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments (AI-ESTATE): Международный (зарубежный) стандарт // Кодекс: электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/461925602> (дата обращения: 12.01.2025).
236. IEC 62243:2012. Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments (AI-ESTATE).
237. IEC 62890:2020. INTERNATIONAL STANDARD. [Электронный ресурс]: <https://webstore.iec.ch/Den.pdf> (дата обращения 24.08.2023)..
238. Industrial Internet of Things (IIoT). [Электронный ресурс]: <https://www.tadviser.ru> (дата обращения 23.08.2023).

239. Industrial Value Chain Reference Architecture / IVI, 2016. [Электронный ресурс]: https://docs.iv-i.org/doc_161208_Industrial_Value_Chain_Reference_Architecture.pdf (дата обращения 16.08.2023).
240. Information Technology Infrastructure Library (ITIL): офиц. сайт. — URL: <http://www.itlibrary.org> (дата обращения: 25.06.2025)
241. Inmon W. H. Building the data warehouse. – John wiley & sons, 2005.
242. Irani Z. Information systems evaluation: navigating through the problem domain //Information & Management. – 2002. – Т. 40. – №. 1. – С. 11-24.
243. ISO/TC 184. Automation systems and integration. [Электронный ресурс]: <https://www.iso.org/committee/54110.html> (дата обращения 20.08.2023).
244. ISO/TC 68. Financial services. [Электронный ресурс]: <https://www.iso.org/ru/committee/49650.html> (дата обращения 17.08.2023).
245. Jain A., Doan A. H., Gravano L. Optimizing SQL queries over text databases //2008 IEEE 24th International Conference on Data Engineering. – IEEE, 2008. – С. 636-645.
246. Khazhiev R. R. et al. Exploring Contextualized Embeddings for C++ Code Search and Algorithms Classification //2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2025. – С. 1-6.
247. Kosanke K. CIMOSA—overview and status //Computers in industry. – 1995. – Т. 27. – №. 2. – С. 101-109.
248. Krčál M. Assessment of enterprise portal benefits : дис. – Master Thesis of the Department Business Economic and Management, Masaryk University, 2018.
249. L. Atzori, A. Lera, G. Morabito. The Internet of Things: A Survey // Computer Networks. — 2010. vol. 54, N 15. P. 2787–2805. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568> (дата обращения: 25.05.2025).

250. Le Mortellec A. et al. Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems //Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2013. – Т. 26. – №. 1. – С. 227-240.
251. Leal G. S., Guédria W., Panetto H. Enterprise interoperability assessment: a requirement engineering approach. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020. Vol. 33. №3. P. 265-286. [Электронный ресурс]:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2020.1736636?scroll=top&needAccess=true&role=tab> (дата обращения 10.04.2023).
252. Li H., Williams T. J. Interface design for the Purdue enterprise reference architecture (PERA) and methodology in e-Work //Production Planning & Control. – 2003. – Т. 14. – №. 8. – С. 704-719.
253. Lydon, B. RAMI 4.0 Reference Architectural Model for Industrie 4.0 // International Society of Automation: офиц. сайт. Дарем, Северная Каролина. URL: <https://www.isa.org/intech-home/2019/march-april/features/rami-4-0-reference-architectural-model-for-industr> (дата обращения: 25.05.2005).
254. Miller J. G. The nature of living systems //Behavioral Science. – 1976. – Т. 21. – №. 5. – С. 295-319.
255. Mohammad U. Smart factory reference model for training on industry 4.0. Journal of Mechanical Engineering. 2019. 16 (2). P. 129-144. ISSN 1823-5514; 2550-164X [Электронный ресурс]: <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/36433/>(дата обращения 17.08.2023).
256. Morel G., Pereira C. E., Nof S. Y. Historical survey and emerging challenges of manufacturing automation modeling and control: A systems architecting perspective //Annual reviews in control. – 2019. – Т. 47. – С. 21-34.
257. Myalapalli V. K., Shiva M. B. An appraisal to optimize SQL queries //2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC). – IEEE, 2015. – С. 1-6.
258. Nakagawa, E. Y. et al. Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends //Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Т. 156. – С. 107241.

259. Nakanishi M., Cooper L. G. Parameter Estimate for multiplicative Interactive Choice Model: Least Squares Approach // J. of Marketing Research. 1974. No. 11. P. 303-311.
260. Nielsen J. Usability engineering. – Morgan Kaufmann, 1994.
261. Nilsson C. Heuristics for the traveling salesman problem // Linköping University, Linköping, Sweden. – 2013.
262. Noran O. An analysis of the Zachman framework for enterprise architecture from the GERAM perspective //annual reviews in control. – 2003. – Т. 27. – №. 2. – С. 163-183.
263. Ordonez C. Optimization of linear recursive queries in SQL //IEEE Transactions on knowledge and Data Engineering. – 2009. – Т. 22. – №. 2. – С. 264-277.
264. Ouyang J., Yan G.R. Multi-group ant colony system algorithm for TSP // Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai. – 2004. – P. 26-29.
265. Palmius J (2007): Criteria for Measuring and Comparing Information Systems 30th Information Systems Research Seminar in Scandinavia.
266. Palmius J (2010): Organization-level information systems: Tools for supporting the development process. Mid Sweden University doctoral thesis 94. Ustersund, Sweden.
267. Palmius J. A theoretical base for the simulation of information systems : дис. – Mid Sweden University, 2005.
268. Parasuraman, A.; Zeithaml, Valerie A. Servqual: A Multiple-Item Scale For Measuring Consumer Perc // Journal of Retailing. - Spring 1988; 64, 1; ABI/INFORM Global pg. 12 [Электронный ресурс]: <https://www.marketeurexpert.fr/wp-content/uploads/2023/12/servqual.pdf> (дата обращения 20.08.2024).
269. Parasuraman, A.; Zeithaml, Valerie A. Servqual: A Multiple-Item Scale For Measuring Consumer Perc // Journal of Retailing. - Spring 1988; 64, 1; ABI/INFORM Global pg. 12 [Электронный ресурс]: <https://www.marketeurexpert.fr/wp-content/uploads/2023/12/servqual.pdf> (дата обращения 20.08.2024).

270. Peeters P. et al. Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops //Artificial Intelligence in Engineering. – 2001. – Т. 15. – №. 4. – С. 343-352.

271. Petrie C. J. Cimos-a european development for enterprise integration part 1: An overview. – 1992.

272. Petter S., DeLone W., McLean E. R. Information systems success: The quest for the independent variables //Journal of management information systems. – 2013. – Т. 29. – №. 4. – С. 7-62.

273. Philips J. et al. PROSA and Delegate MAS in Robotics //Holonc and Multi-Agent Systems for Manufacturing: 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2011, Toulouse, France, August 29-31, 2011. Proceedings 5. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – С. 195-204.

274. R. Howells. The Business Case for IoT. SAP, 18 June 2015. URL: <http://scn.sap.com/community/business-trends/blog/2015/06/18/the-business-case-for-iot> (дата обращения: 25.05.2025).

275. RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0). [Электронный ресурс]: <https://www.sci40.com/english/thematic-fields/rami4-0/> (дата обращения 15.08.2023).

276. RAMI 4.0. [Электронный ресурс]: <https://www.iiot-worlds.com/ru/rami-4-0-%d1%8d%d1%82%d0%b0%d0%bb%d0%be%d0%bd%d0%bd%d0%b0%d1%8f-%d0%b0%d1%80%d1%85%d0%b8%d1%82%d0%b5%d0%ba%d1%82%d1%83%d1%80%d0%bd%d0%b0%d1%8f-%d0%bc%d0%be%d0%b4%d0%b5%d0%bb%d1%8c-industrie-4-0/> (дата обращения 24.08.2023).

277. Razali N., Geraghty J. Genetic algorithm performance with different selection strategies in solving TSP // Proceedings of the World Congress on Engineering. – London, UK. – 2011. – Vol. II. – 6 p.

278. Reddy G. S. et al. Data Warehousing, Data Mining, OLAP and OLTP Technologies are essential elements to support decision-making process in industries // International Journal on Computer Science and Engineering. 2010. Vol. 2. No. 9. P. 2865-2873.

279. Romanov N. O. et al. Studying Data Normalization Methods in the Sustainable Development Indicators Analysis //2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2025. – C. 1-4.

280. Romanov N. O. et al. Studying Data Normalization Methods in the Sustainable Development Indicators Analysis //2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2025. – C. 1-4.

281. S. Barry, S. Assoul, N. Souissi Benchmarking of digital maturity models according to the dimension component / 2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET) : Meknes, Morocco. – 2022. – pp. 1-8. – doi: 10.1109/IRASET52964.2022.9737781.

282. Saint Germain B. et al. Networked manufacturing control: an industrial case //CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2011. – T. 4. – №. 3. – C. 324-326.

283. Schweichhart, K. Reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0) //An Introduction. – 2016. – T. 40.

284. Shannon C. E., Weaver W. A mathematical model of communication //Urbana, IL: University of Illinois Press. – 1949. – T. 11. – C. 11-20.

285. Shilakes C. C. Enterprise information portals //Merrill Lynch in-depth report. – 1998.

286. Skvortsova D. A. et al. Building an information system architecture for analyzing the criteria of sustainable development goals //Lex localis-Journal of Local Self-Government. – 2025. – T. 23. – №. S5. – C. 1093-1109.

287. Skvortsova D. A. et al. Corporate Portal as a Visual Information Analysis Tool for the Management Decision Support System //2025 7th International

Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2025. – С. 1-5.

288. Skvortsova D. A., Girin I. A., Development of Database Architecture for Assessing the Digital Maturity Index of Industrial Enterprises //2026 International Conference on Integrated Intelligence and Cognitive Engineering (ICIICE). – IEEE, 2026. – С. 1-5.

289. Skvortsova. D.A. Creation of flexible manufacturing systems for automated assembly / D.A. Skvortsova - Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2006. - Т. 35. - № 1. - P. 40.

290. Skvortsova. D.A. Forecasting the values of factors influencing the development of high-tech industries in the Russian Federation / D.A. Skvortsova, N.O. Romanov. - Moscow: 5th Interacademic Conference on Science, Engineering and Business, 2023.

291. Smith R. G. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver //IEEE Transactions on computers. – 1980. – V. 29. – №. 12. – P. 1104-1113.

292. SOA И EDA: РАЗНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ ИЛИ ОДНА И ТА ЖЕ? [Электронный ресурс]: URL: <https://12news.ru> (дата обращения 12.09.2023)

293. Stolterman E. Designarbetets dolda rationalitet: en studie av metodik och praktik inom systemutveckling : дис. – Umeå universitet, 1991.

294. Suarez-Fernandez de Miranda S. et al. Life cycle engineering 4.0: A proposal to conceive manufacturing systems for industry 4.0 centred on the human factor (DfHFinI4. 0) //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 13. – С. 4442.

295. Sueli Almeida M. et al. Getting Started with Datawarehouse and Business Intelligence //IBM–International Technical Support Organization. – 1999.

296. Taipalus T. A notation for planning SQL queries //Journal of Information Systems Education. – 2019. – Т. 30. – №. 3. – С. 160-166.

297. The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything // cisco.com: сайт. – URL: https://www.cisco.com/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf (дата обращения: 01.06.2025)

298. Torkzadeh G., Doll W. J. The development of a tool for measuring the perceived impact of information technology on work //Omega. – 1999. – Т. 27. – №. 3. – С. 327-339.
299. Uğur A., Aydin D. An interactive simulation and analysis software for solving TSP using Ant Colony Optimization algorithms //Advances in Engineering software. – 2009. – P. 341–349.
300. Valckenaers P. et al. PROSA and delegate MAS for open-air engineering processes //ETFA2011. – IEEE, 2011. – С. 1-8.
301. Valckenaers P. Results of the Holonic Control System Benchmark at the K.U. Leuven / Valckenaers P., Bonneville F., Van Brussel H., Bongaerts L., Wyns J. // Proceedings of the CIMAT Conference (Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology). – 1994. – P. 128-133.
302. Value Stream Mapping (VMS): офиц. сайт. — URL: <https://www.lean.org/>
303. Vassiliadis P., Simitsis A., Skiadopoulos S. Conceptual modeling for ETL processes // Proceedings of the 5th ACM international workshop on Data Warehousing and OLAP. 2002. P. 14-21.
304. White M. Enterprise information portals //The Electronic Library. – 2000. – Т. 18. – №. 5. – С. 354-362.
305. Williams T. J. The Purdue enterprise reference architecture //Computers in industry. – 1994. – Т. 24. – №. 2-3. – С. 141-158.
306. Williams T. J. The Purdue enterprise reference architecture //IFAC Proceedings Volumes. – 1993. – Т. 26. – №. 2. – С. 559-564.
307. Yue M., Hong T., Wang J. Descriptive analytics-based anomaly detection for cybersecure load forecasting. 2019. [Электронный ресурс]: URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8620375> (дата обращения 12.09.2023).
308. Zhan S., Lin J., Zhang Z., Zhong Y. List-based simulated annealing algorithm for traveling salesman problem // Computational Intelligence and Neuroscience — 2016. – 41–349.

309. Zipf G. K. Human behavior and the principle of least effort. Cambridge: Addison Wesley, 1949.
310. Žižović M., Miljković B., Marinković D. Objective methods for determining criteria weight coefficients: A modification of the CRITIC method // Decision Making: Applications in Management and Engineering. 2020. Vol. 3. No. 2. P. 149-161.

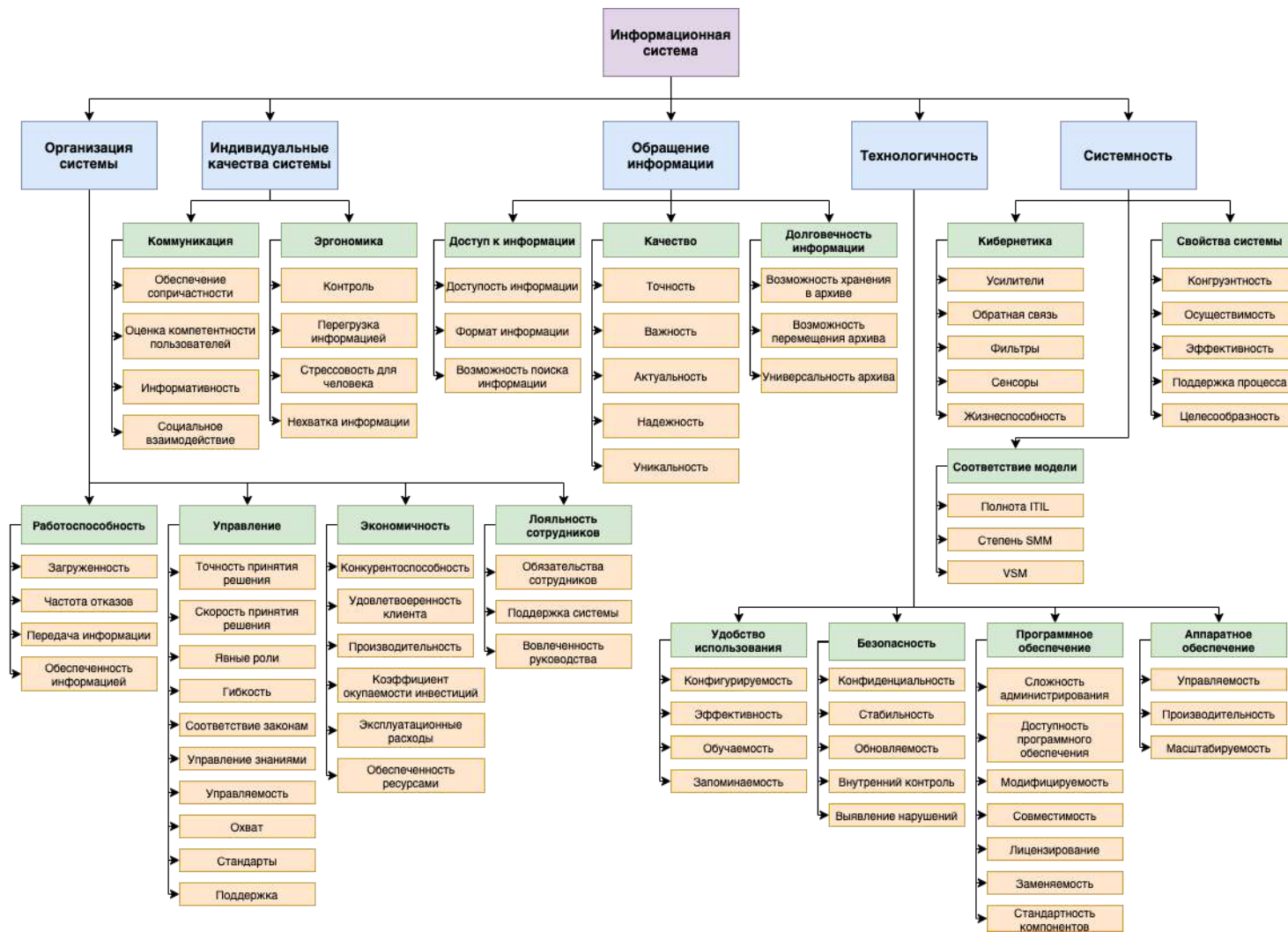
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОБОБЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСА СВОЙСТВ РЕБЕР ГРАФА

Ребро	Перечень переходов			Состав комплекта			Перечень оборудования			Перечень оснастки			Режимы		
	$(\Pi_{r1,2})_1$	$(\Pi_{r1,2})_2$	$(\Pi_{r1,2})_3$	$(K_{r1,2})_1$	...	$(K_{r1,2})_l$	$(O_{r1,2})_1$	...	$(O_{r1,2})_m$	$(Oc_{r1,2})_1$	...	$(Oc_{r1,2})_n$	$(P_{r1,2})_1$	...	$(P_{r1,2})_n$
$r_{2,3}$	$(\Pi_{r2,3})_1$	...	$(\Pi_{r2,3})_k$												
...															
$r_{i,j}$	$(\Pi_{ri,j})_1$	...	$(\Pi_{ri,j})_k$	$(K_{ri,j})_1$	...	$(K_{ri,j})_l$	$(O_{ri,j})_1$	...	$(O_{ri,j})_m$	$(Oc_{ri,j})_1$	...	$(Oc_{ri,j})_n$	$(P_{ri,j})_1$	...	$(P_{ri,j})_n$

Представление взаимосвязи параметров объединенных множеств

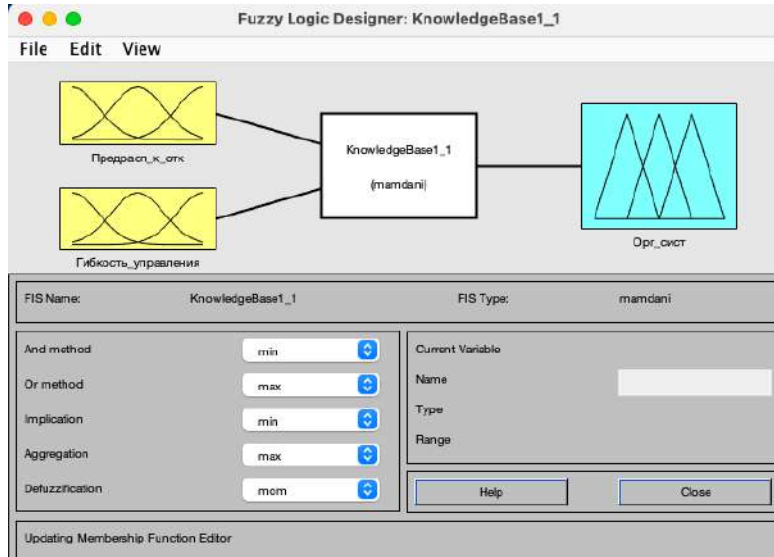
Переход	Оборудование	Оснастка	Состав комплекта	Режимы	Ребра	Параметры ТП
Π_1	O_1	Oc_1	K_1	P_1	$r_{i,j}, \dots, r_{k,l}$	$T_a, S_b, \dots, R_c$
Π_2	O_2	Oc_2	K_2	P_2	$r_{m,n}, \dots, r_{o,p}$	$T_d, S_e, \dots, R_f$
...	...	...	...	...	...	...
Π_k	O_k	Oc_k	K_k	P_k	$R_{s,t}, \dots, r_{u,v}$	$T_g, S_h, \dots, R_i$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

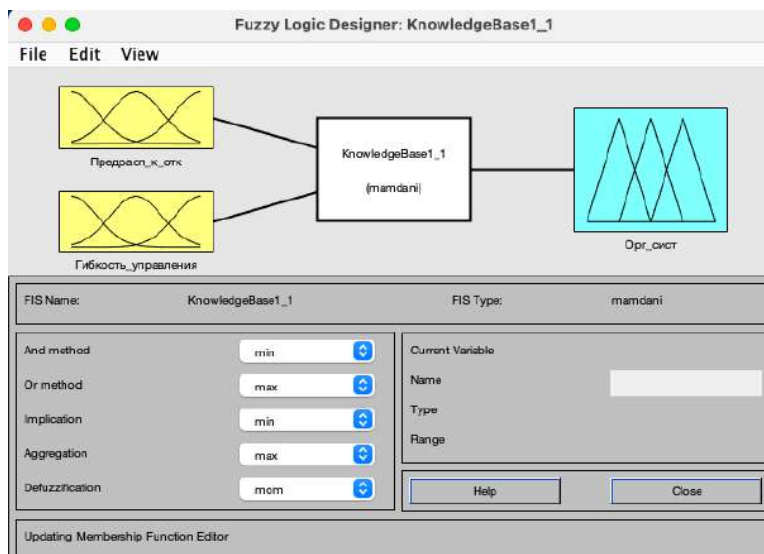


ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПАРАМЕТРЫ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ КРИТЕРИЕВ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В.1. Блок 1.1 (Предрасположенность к отказам, Гибкость управления → Организационная система)

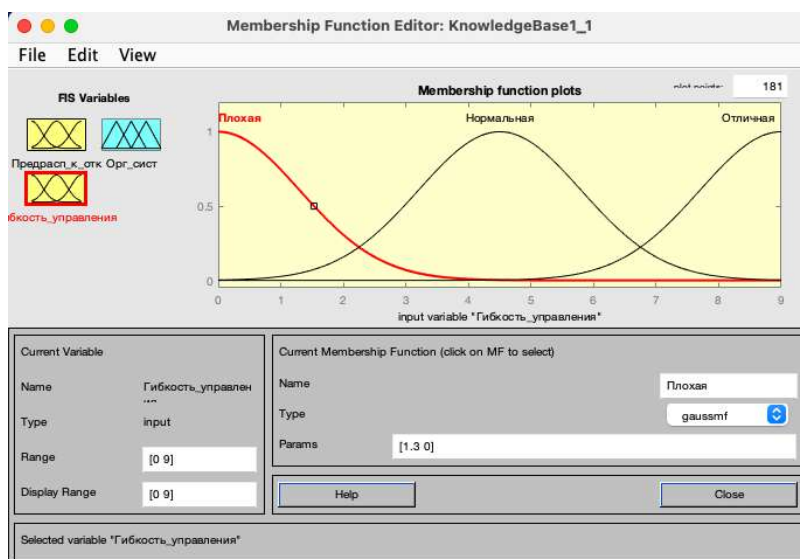


Этап 1 – Формирование терм-множеств и параметров НЛВ (Fuzzy Logic Designer):



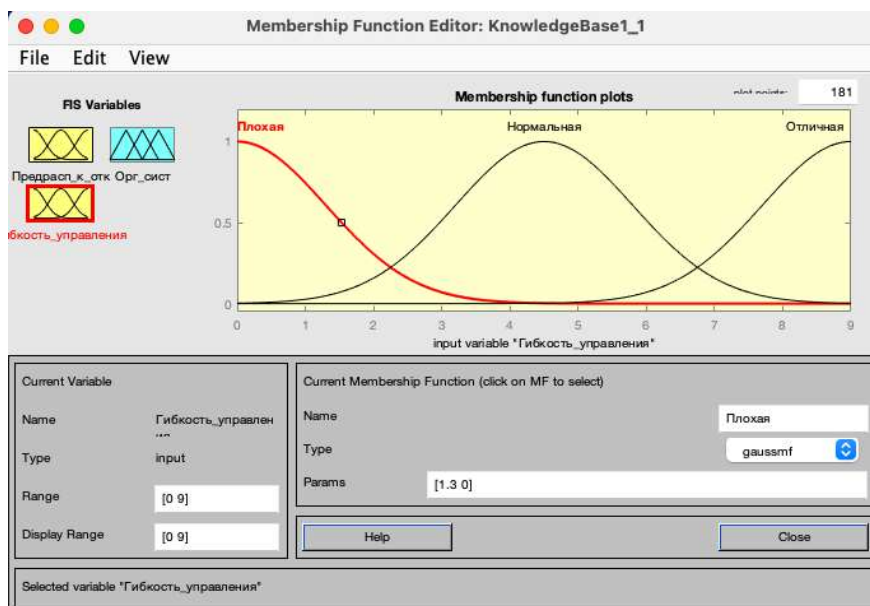
Этап 2 – Функции принадлежности входного терм-множества «Предрасположенность к отказам»

Терм	Range	Type	Params
Мало	[0, 10]	gaussmf	[2, 2]
Среднее количество	[0, 10]	gaussmf	[2, 5]
Много	[0, 10]	gaussmf	[2, 8]



Этап 3 – Функции принадлежности входного терм-множества «Гибкость управления»:

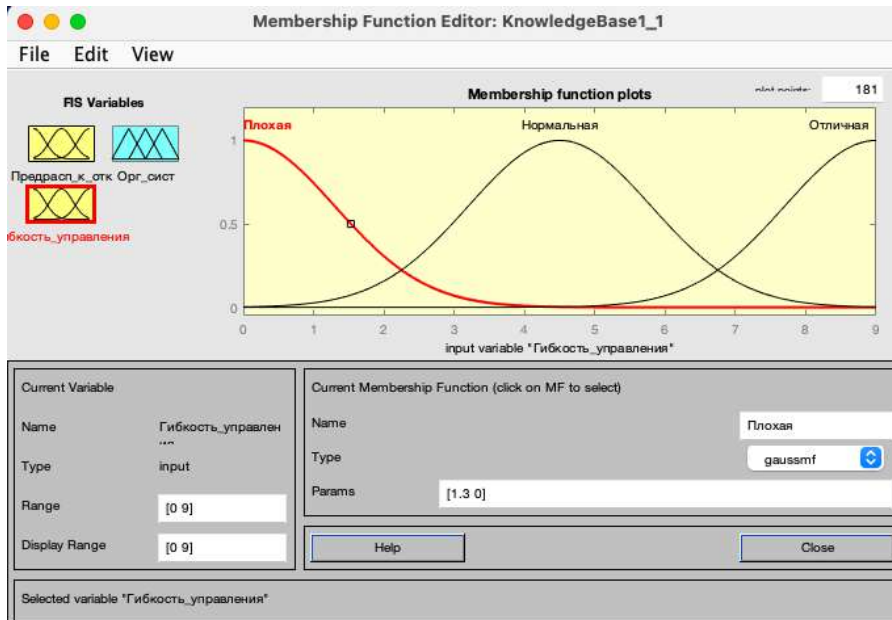
Терм	Range	Type	Params
Плохая	[0, 100]	gaussmf	[15, 30]
Нормальная	[0, 100]	gaussmf	[15, 50]
Отличная	[0, 100]	gaussmf	[15, 70]



Этап 4 – Функции принадлежности выходного терм-множества «Организационная система»:

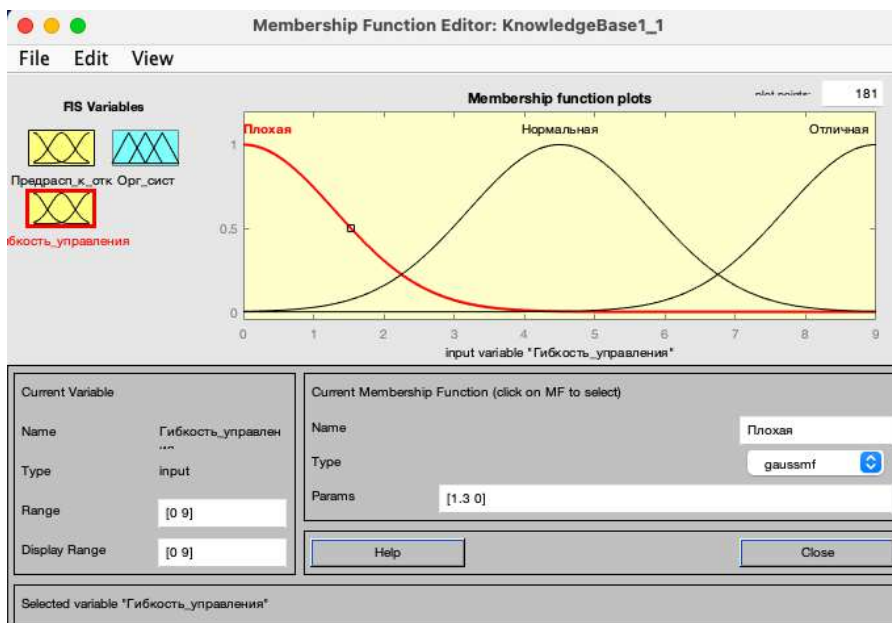
Терм	Range	Type	Params
------	-------	------	--------

Плохая	[0, 100]	gaussmf	[15, 30]
Нормальная	[0, 100]	gaussmf	[15, 50]
Отличная	[0, 100]	gaussmf	[15, 70]

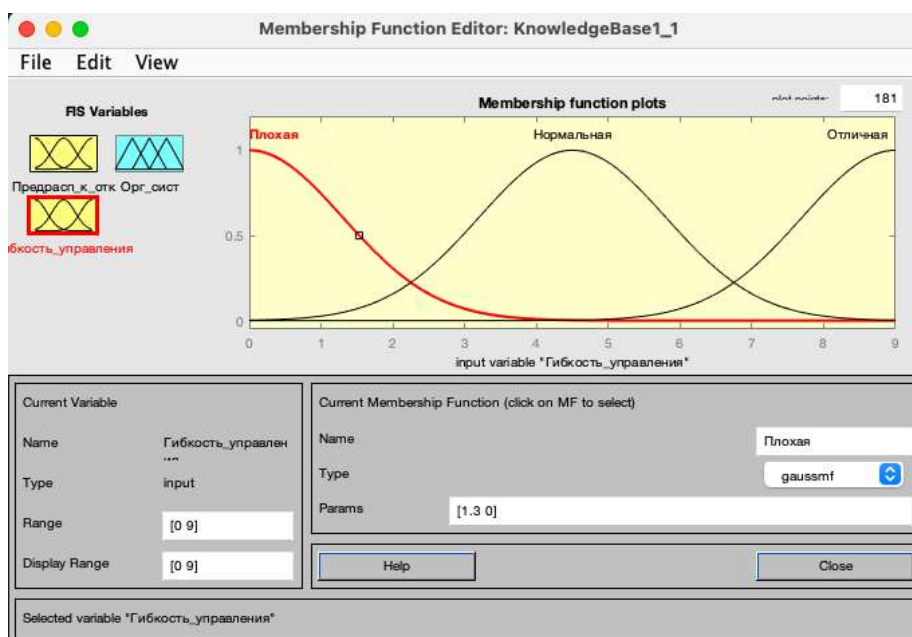


Этап 5 – Визуализация поверхности отклика «Предрасположенность к отказам», «Гибкость управления» - «Организационная система» (Surface Viewer).

В.2. Блок 1.2 (Уровень стресса, Удовлетворенность, Предрасположенность к ошибкам → Индивидуальные качества системы)

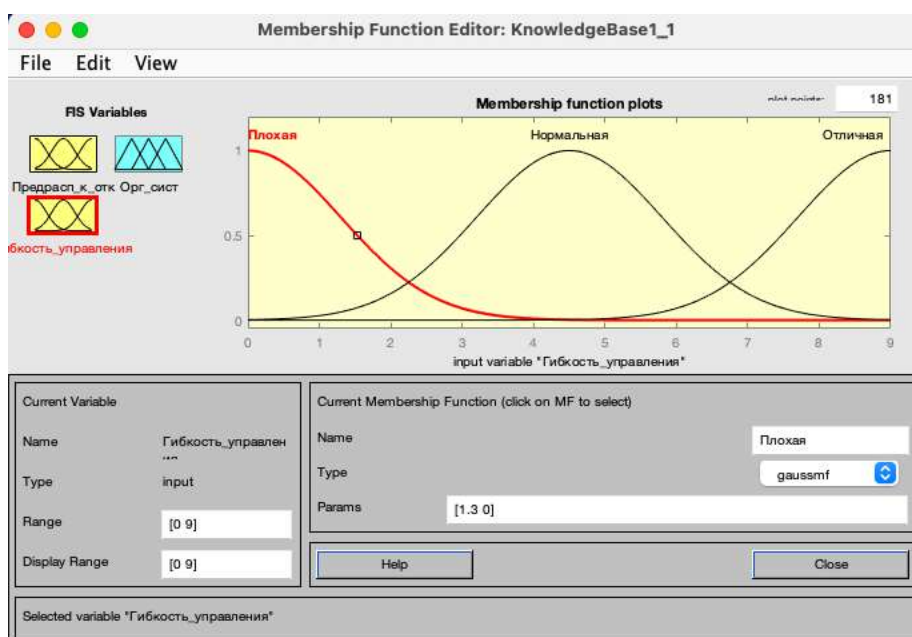


Этап 6 – Формирование терм-множеств и параметров НЛВ

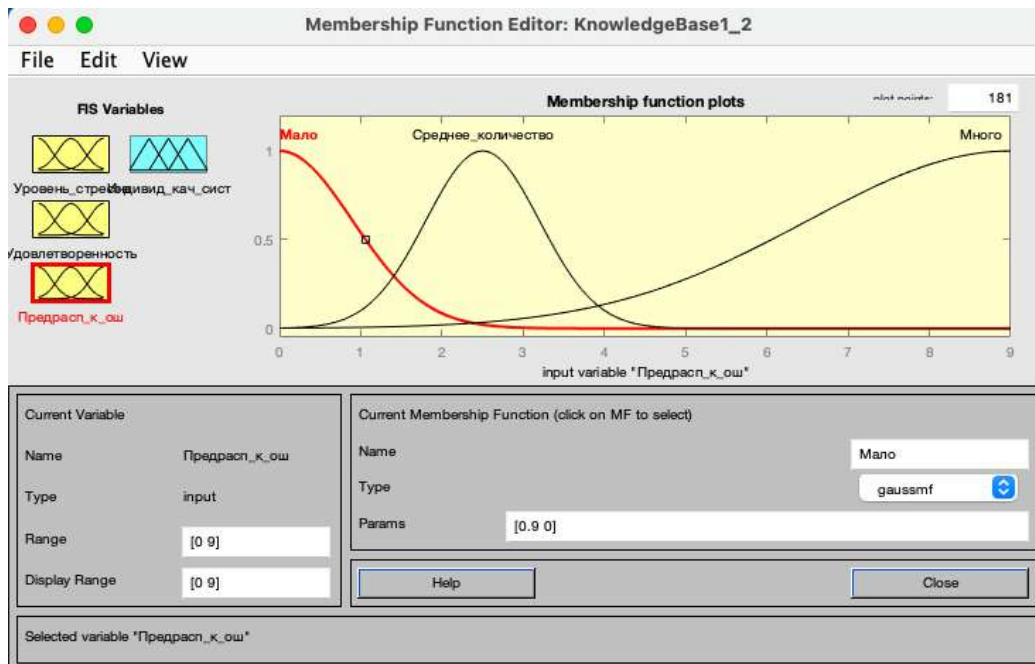


Этап 7 – Функции принадлежности входного терм-множества «Уровень стресса пользователей»

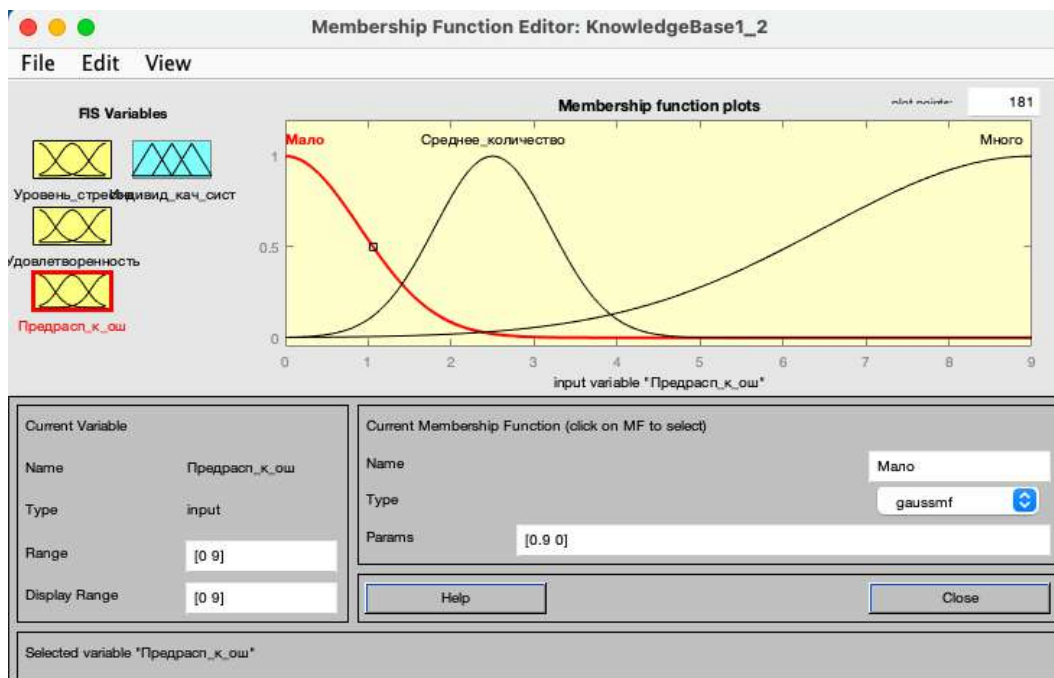
Терм	Range	Type	Params
Низкий	[60, 120]	gaussmf	[10, 70]
Средний	[60, 120]	gaussmf	[10, 90]
Высокий	[60, 120]	gaussmf	[10, 110]



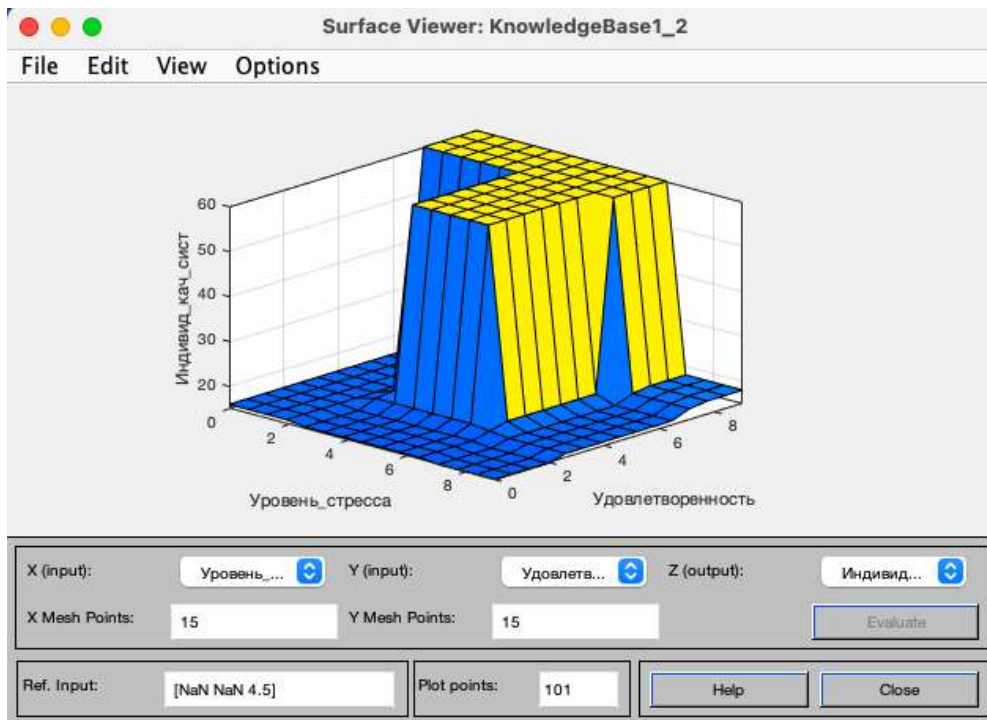
Этап 8 – Функции принадлежности входного терм-множества «Удовлетворенность пользователей».



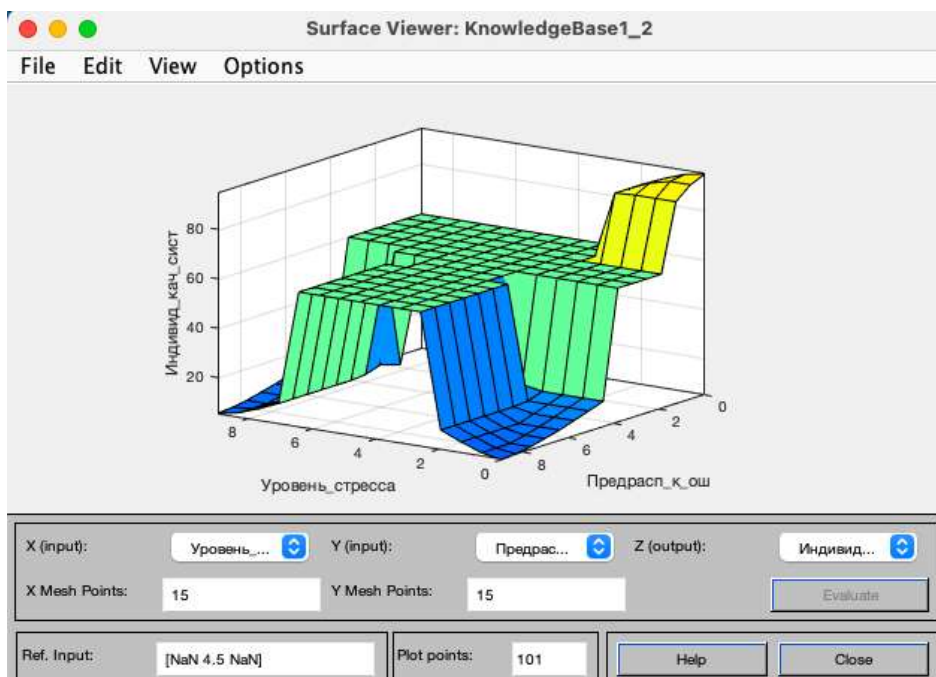
Этап 9 – Функции принадлежности входного терм-множества «Предрасположенность к ошибкам».



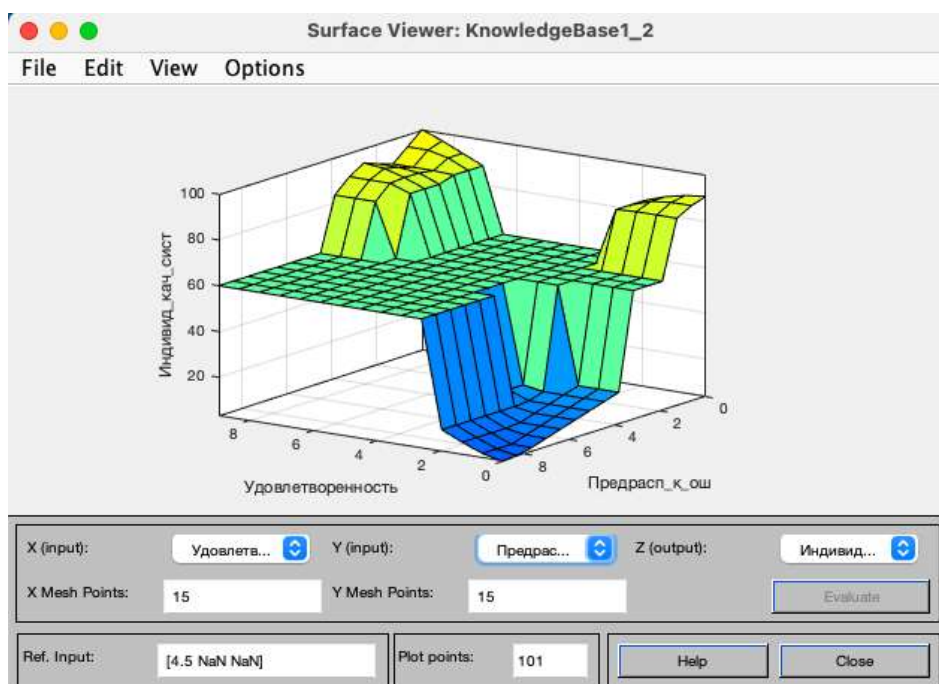
Этап 10 – Функции принадлежности выходного терм-множества «Индивидуальные качества системы».



Этап 11 – Визуализация поверхностей отклика «Уровень стресса пользователей», «Удовлетворенность пользователей» - «Индивидуальные качества системы»



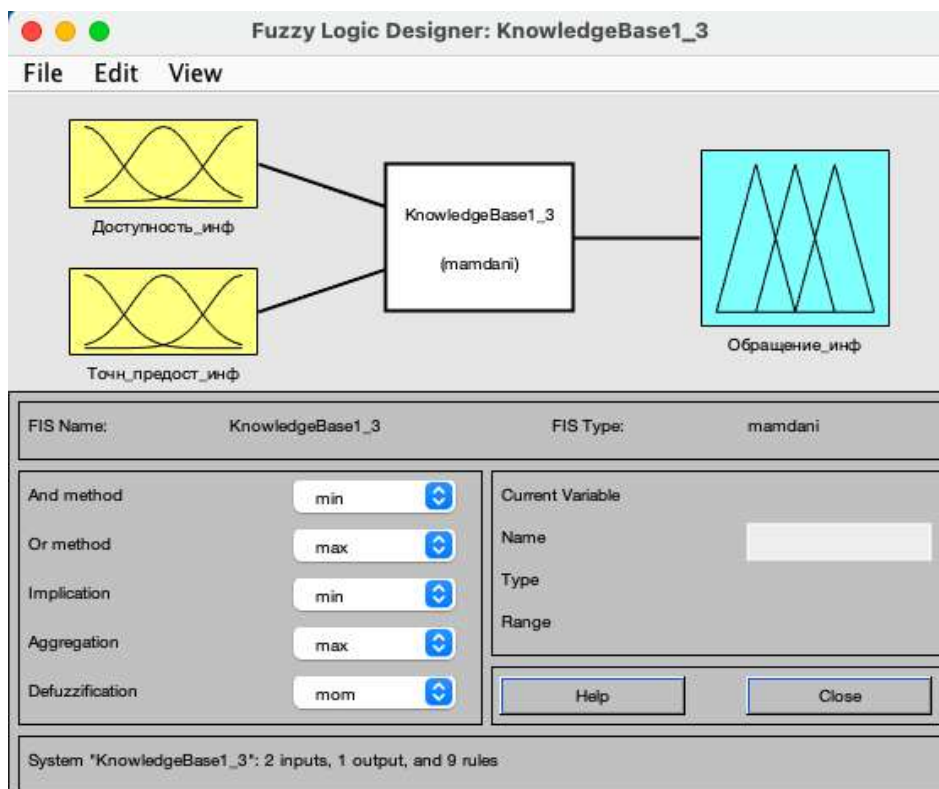
Этап 12 – Визуализация поверхностей отклика «Уровень стресса пользователей», «Предрасположенность к ошибкам» - «Индивидуальные качества системы»



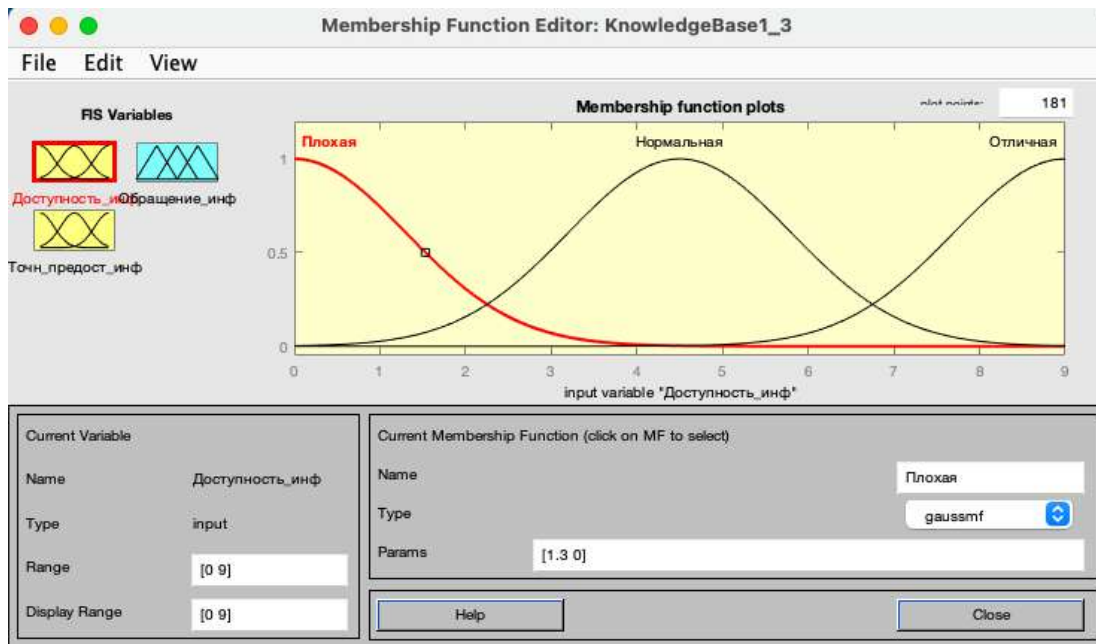
Этап 13 – Визуализация поверхностей отклика «Удовлетворенность пользователей», «Предрасположенность к ошибкам» - «Индивидуальные качества системы»

База знаний: 27 правил.

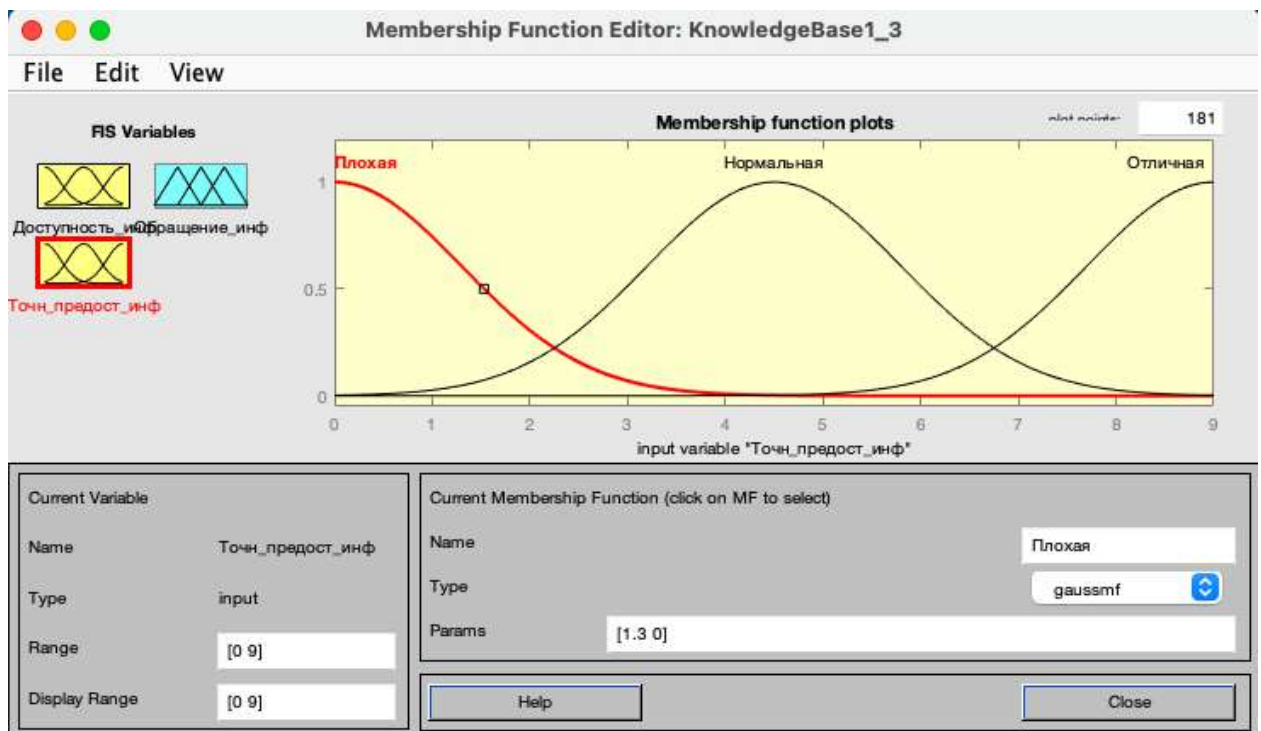
В.3. Блок 1.3 (Доступность информации, Точность информации → Обращение информации)



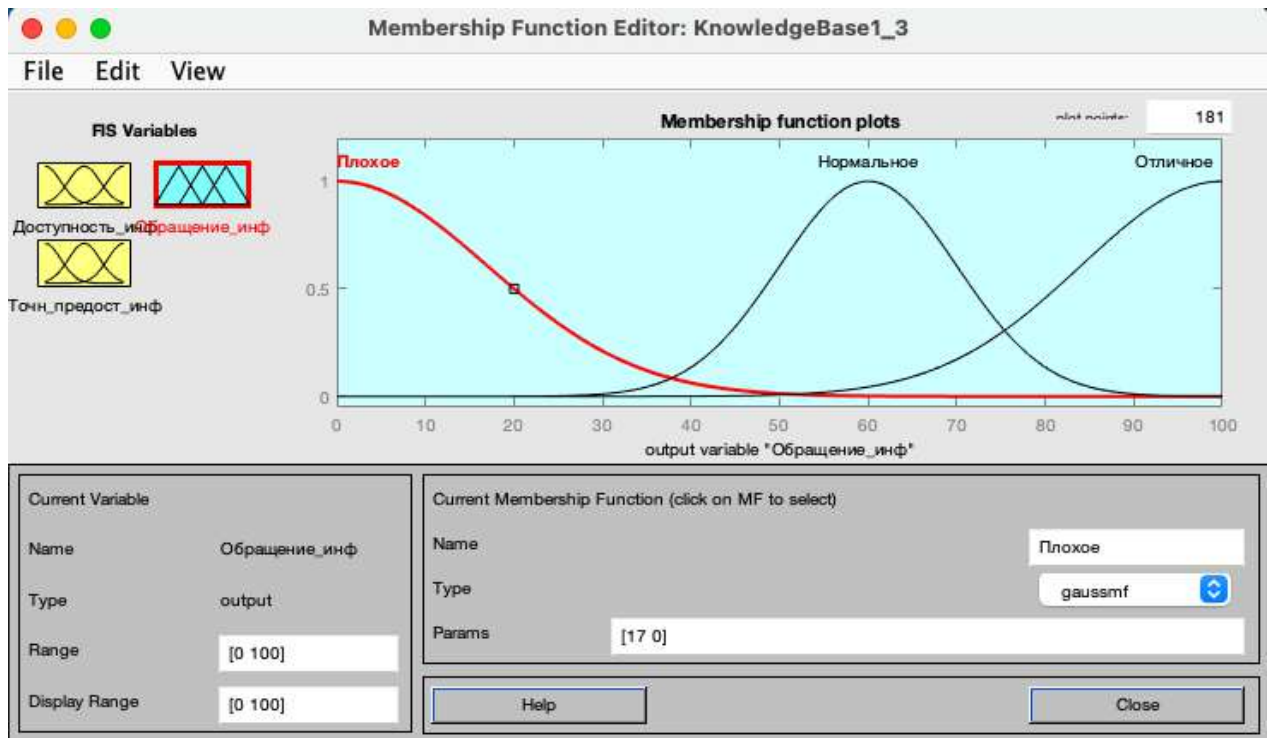
Этап 14 - Формирование терм множеств и параметров НЛВ



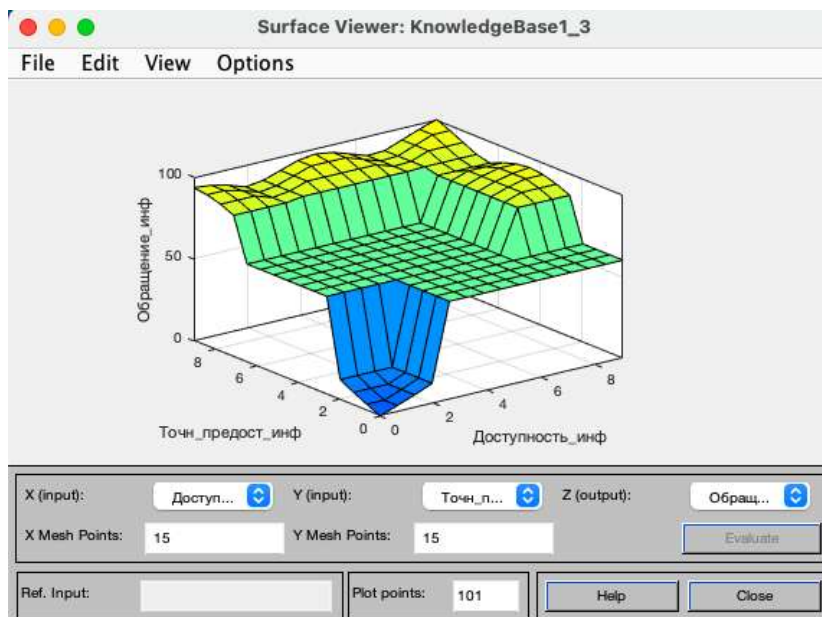
Этап 15 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Доступность информации»



Этап 16 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Точность предоставления информации»



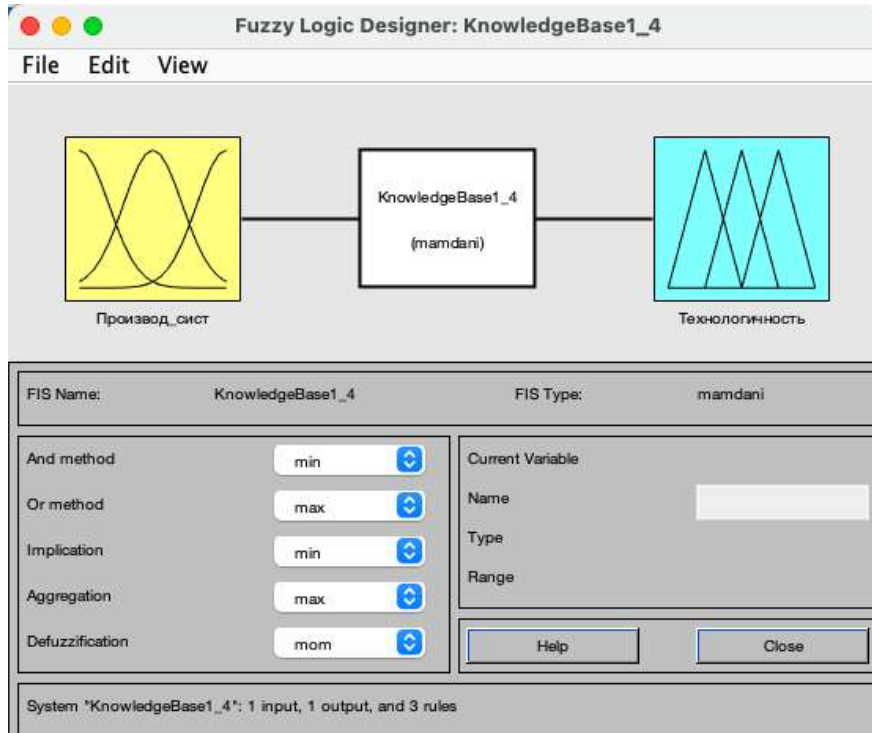
Этап 17 - Функции принадлежности выходных терм-множеств критерия «Обращение информации»



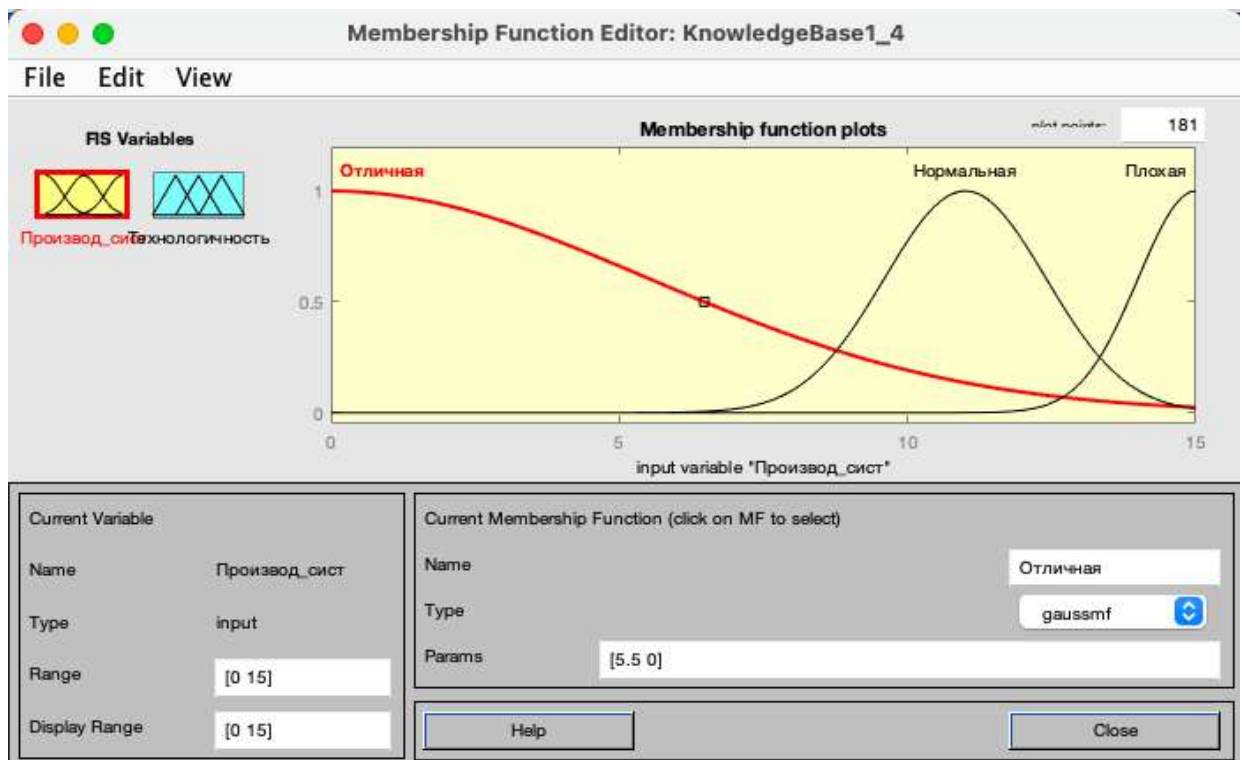
Этап 18 - Визуализация поверхности «Доступность информации», «Точность предоставления информации» - «Обращение информации»

В.4. Блок 1.4 (Производительность системы → Технологичность)

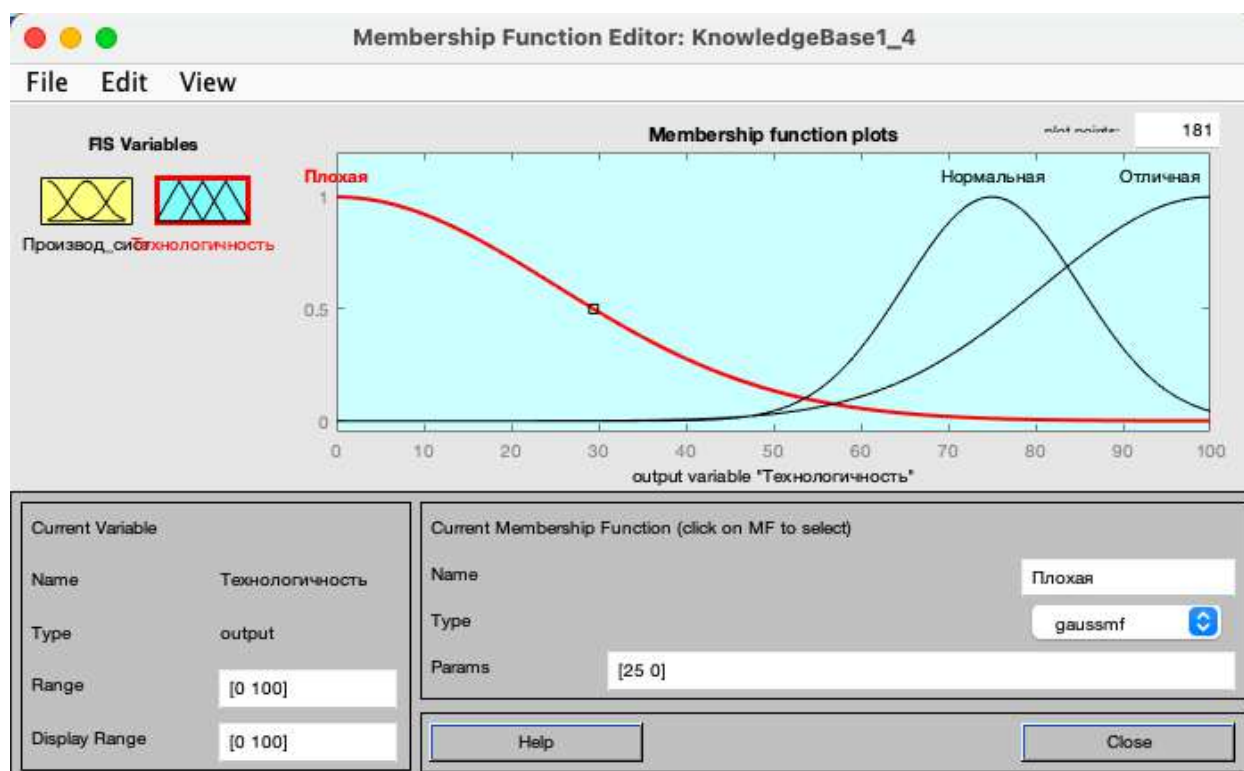
Блок 1.4. Формирование входных терм-множеств для каждого критерия оценки системы управления производством. Добавление выделенных входных критериев, выходного критерия (лингвистических переменных) в раздел Fuzzy Logic Designer.



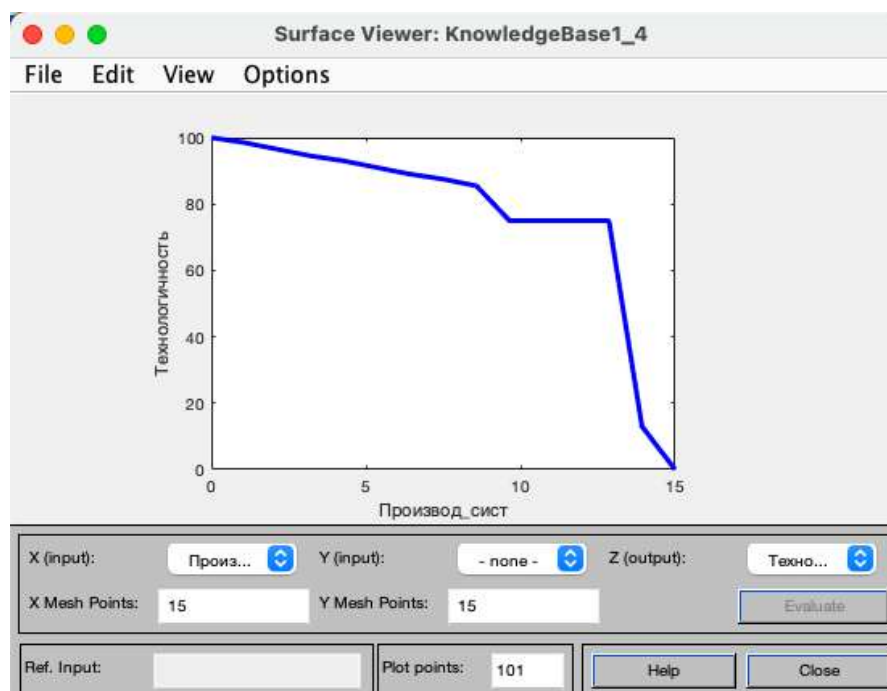
Этап 19 - Формирование терм множеств и параметров НЛВ



Этап 20 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Производительность системы» (время отклика системы)

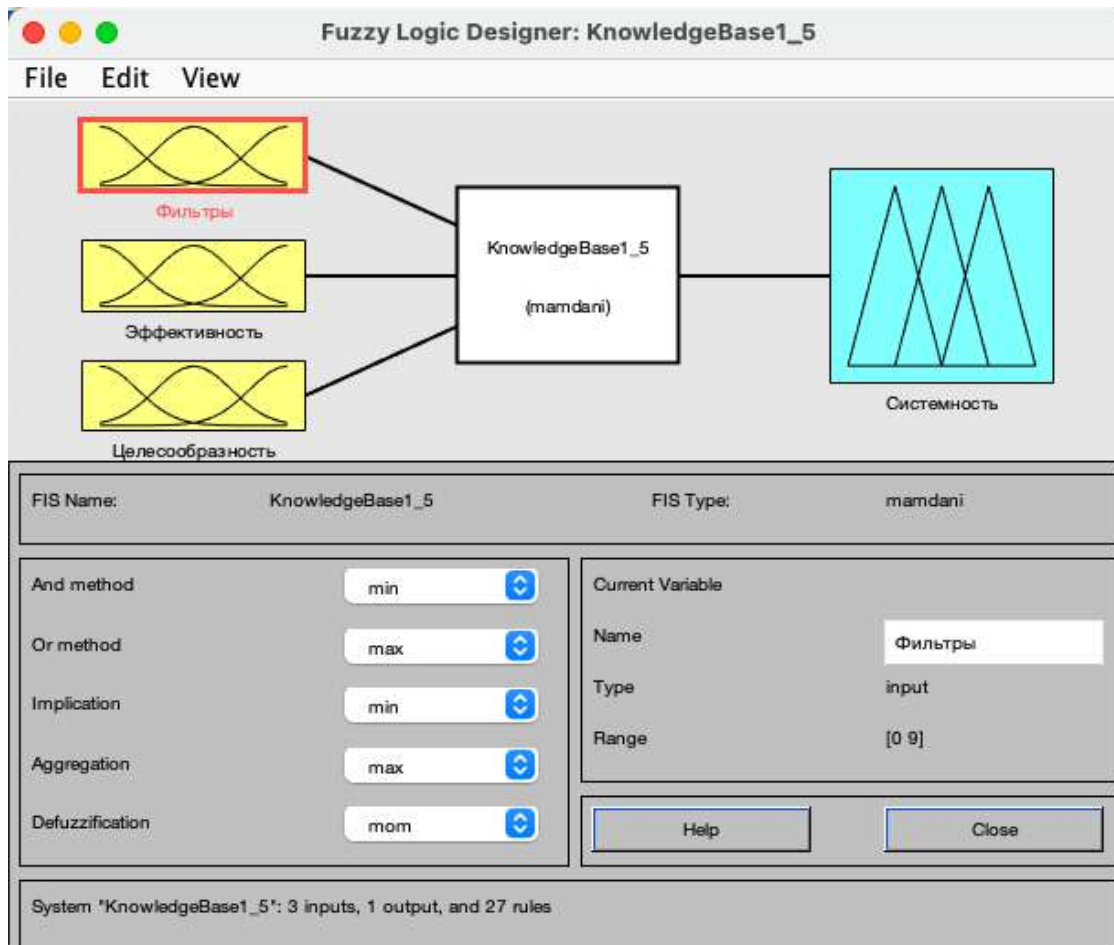


Этап 21 - Функции принадлежности выходных терм-множеств критерия «Технологичность»

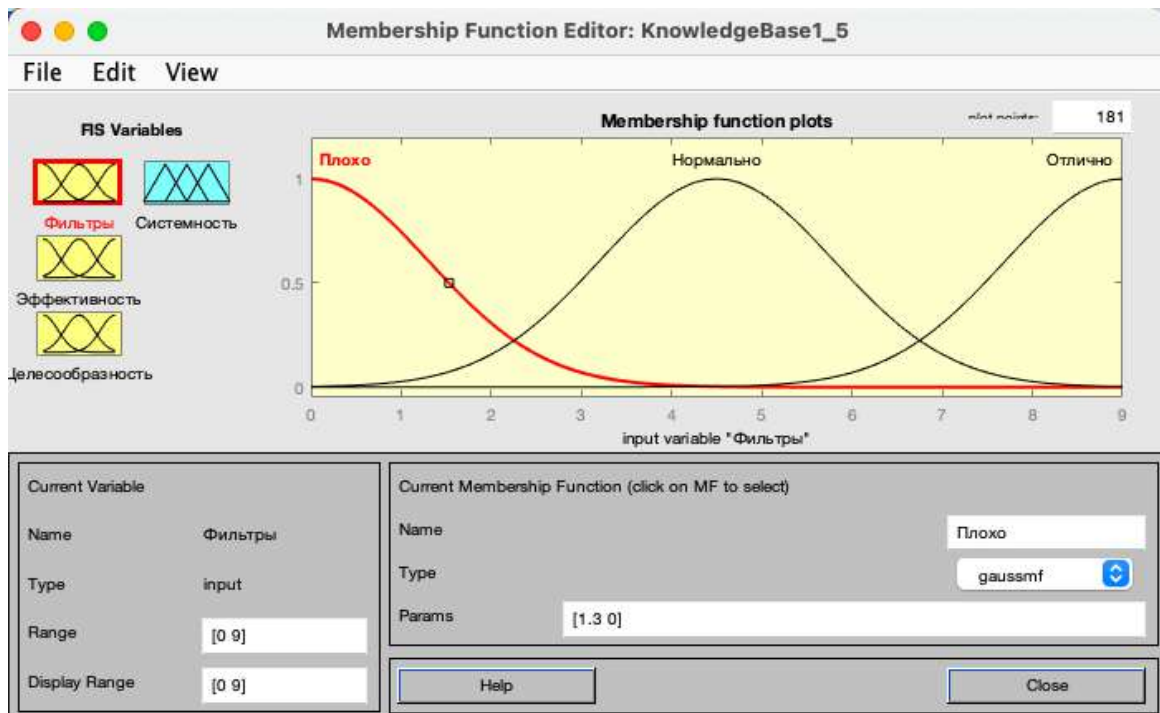


Этап 22 - Визуализация кривой «Производительность системы» (время отклика) - «Технологичность»

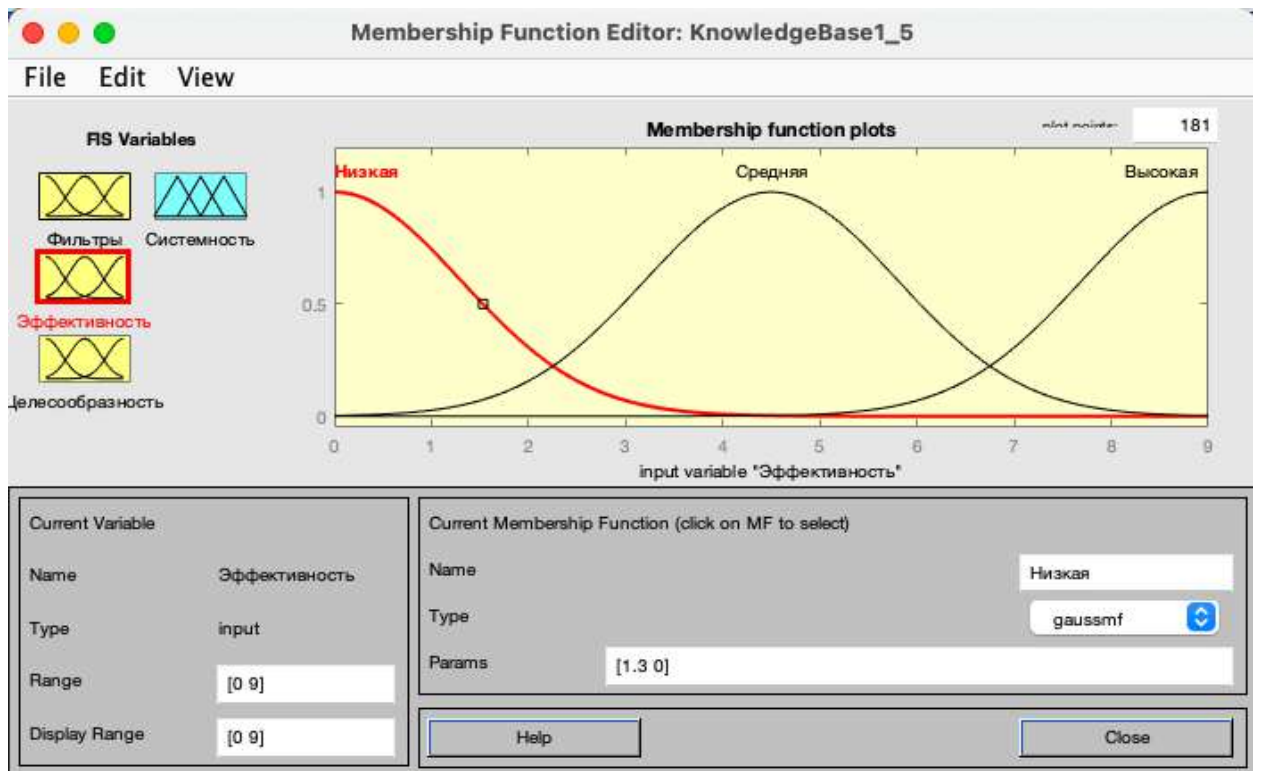
В.5. Блок 1.5 (Фильтры, Эффективность, Целесообразность → Системность)



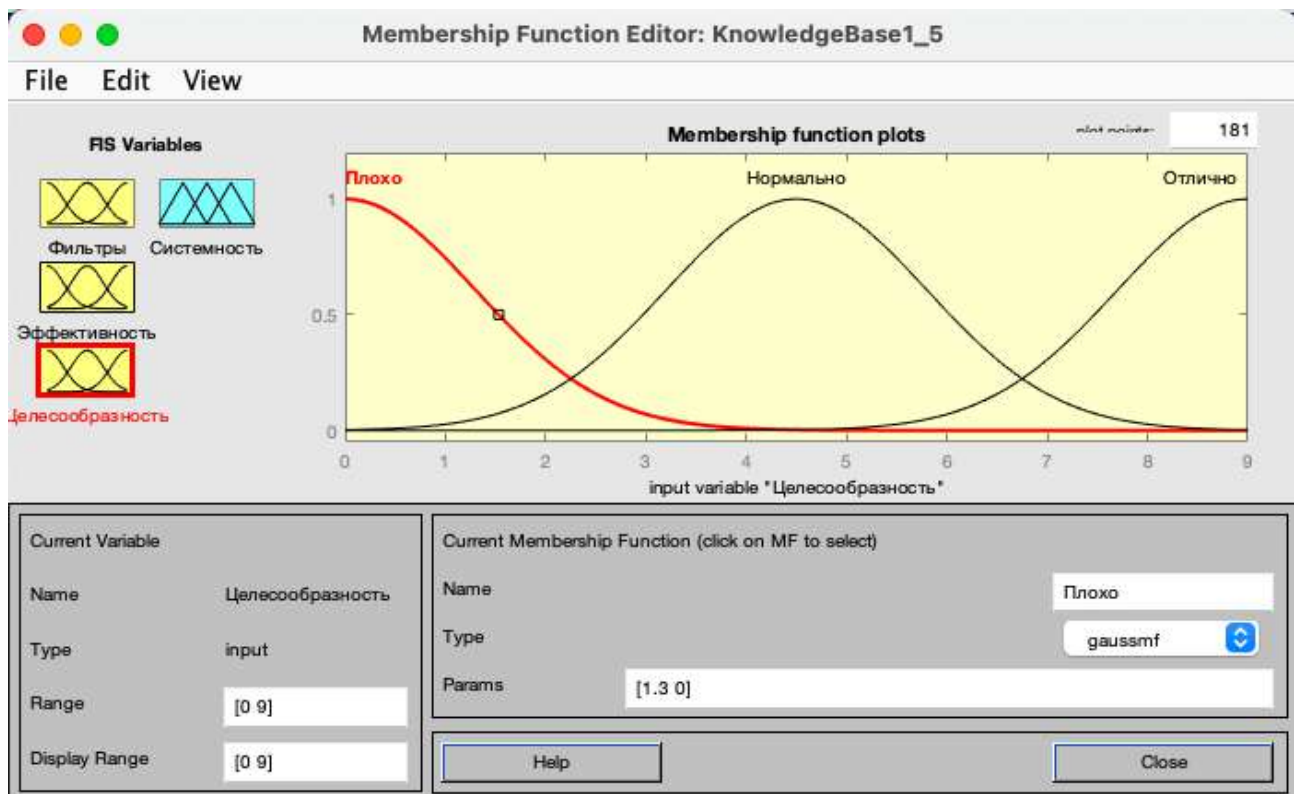
Этап 23 - Формирование терм множеств и параметров НЛВ



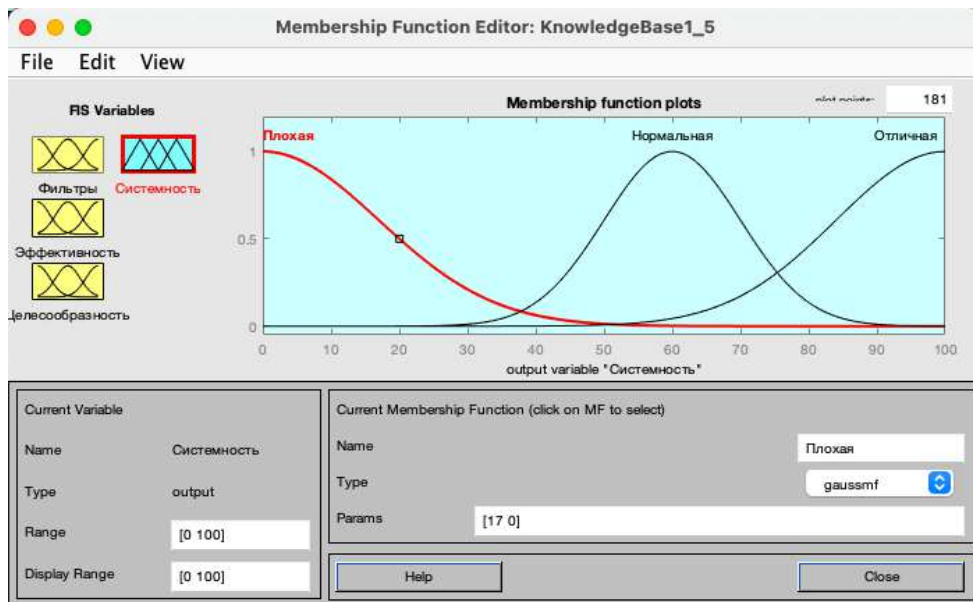
Этап 24 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Фильтры»



Этап 25 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Эффективность»

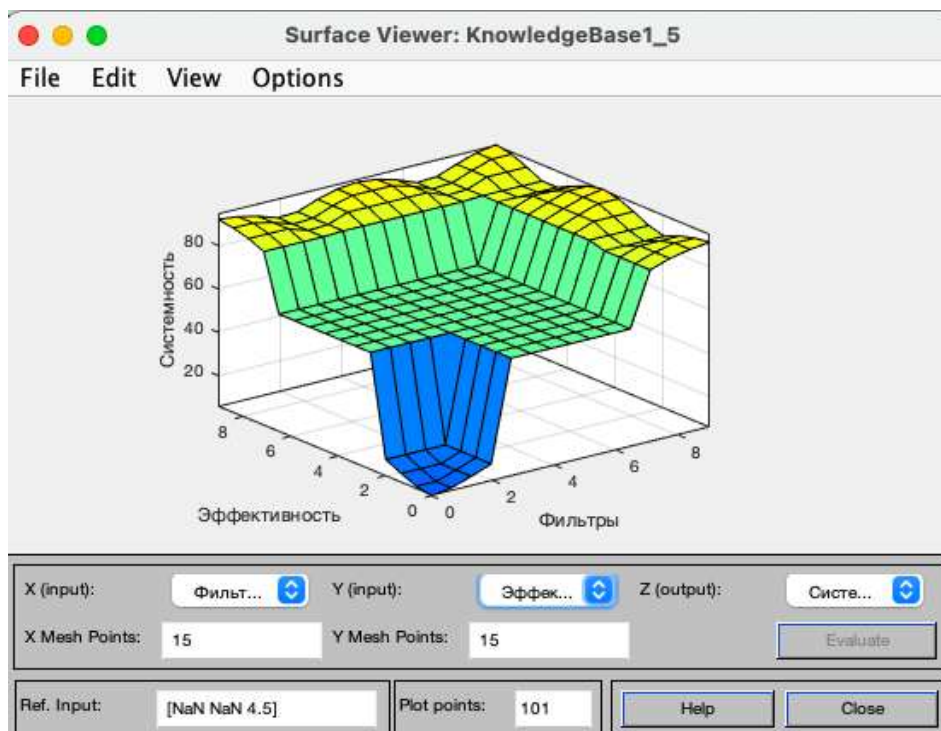


Этап 26 - Функции принадлежности входных терм-множеств критерия «Целесообразность»

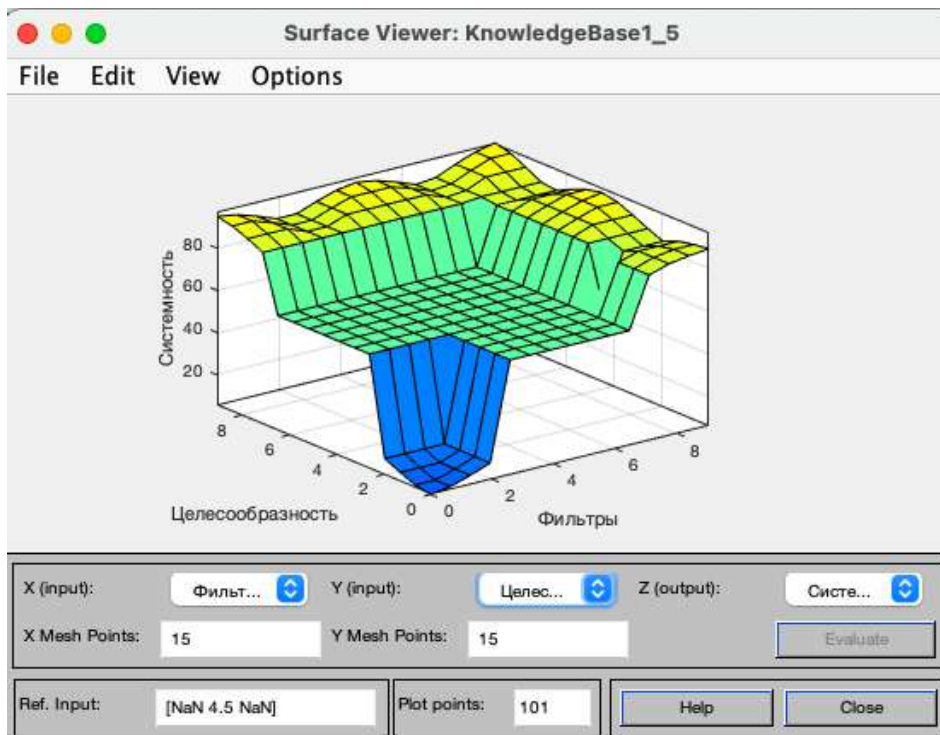


Этап 27 - Функции принадлежности выходных терм-множеств критерия «Системность»

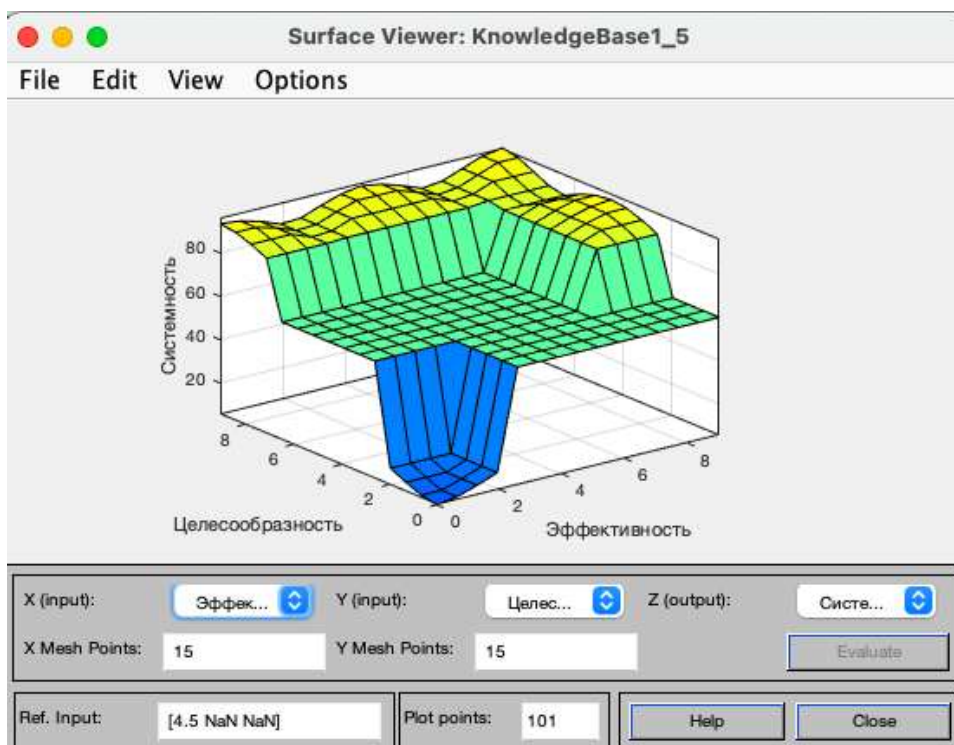
Формирование баз знаний в Rule Editor. База знаний содержит 27 правил. Визуализация поверхностей «входы» - «выход» в Surface Viewer.



Этап 28 - Визуализация поверхности «Фильтры», «Эффективность» - «Системность»



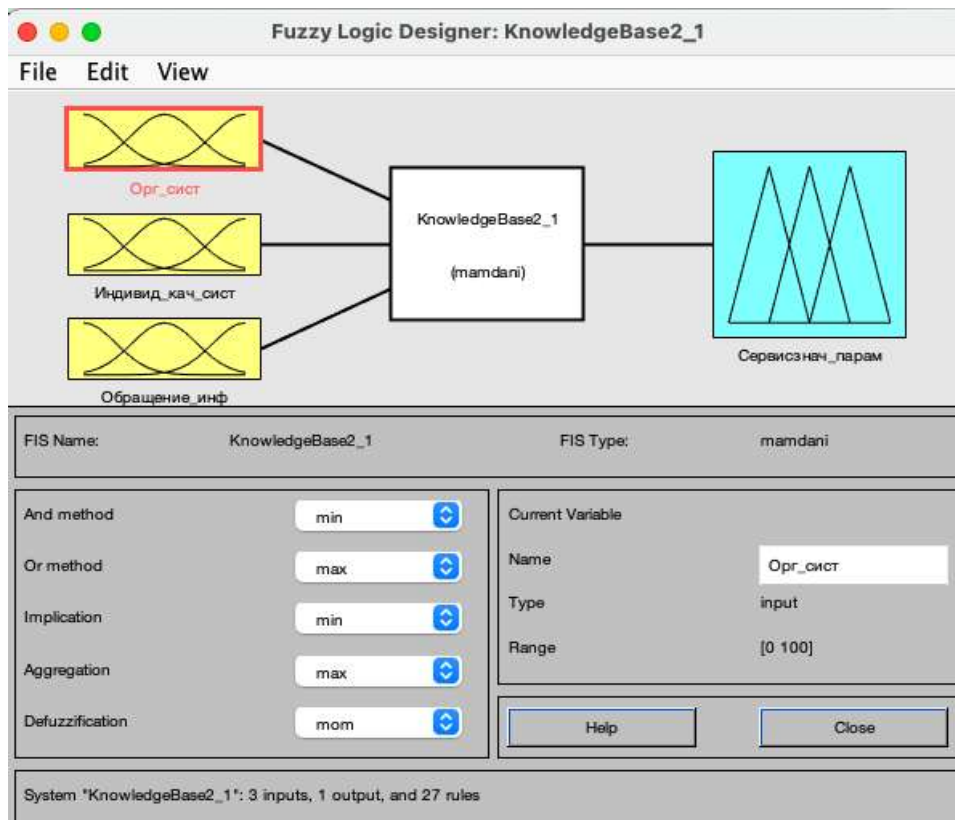
Этап 29 - Визуализация поверхности «Фильтры», «Целесообразность» - «Системность»



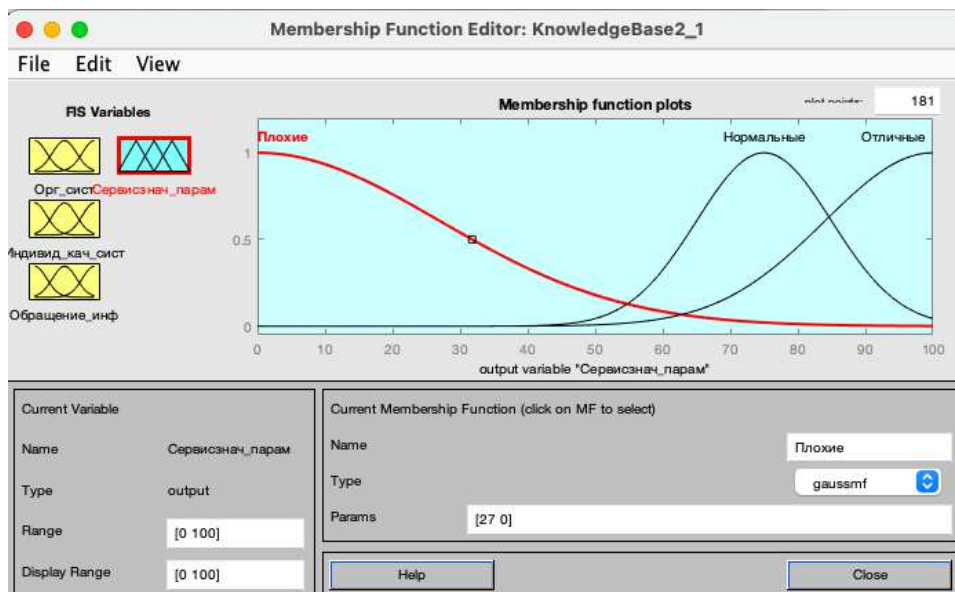
Этап 30 - Визуализация поверхности «Эффективность», «Целесообразность» - «Системность»

База знаний: 27 правил.

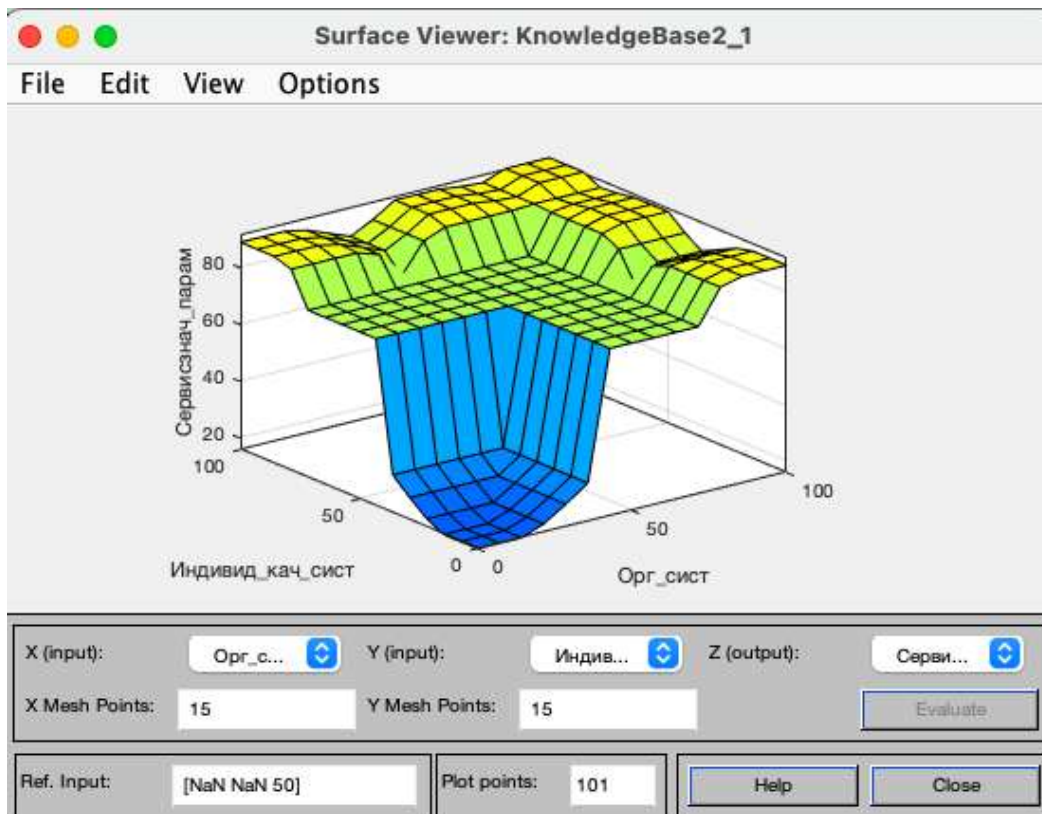
В.6. Блок 2.1 (Организационная система, Индивидуальные качества, Обращение информации → Сервисзначимые параметры)



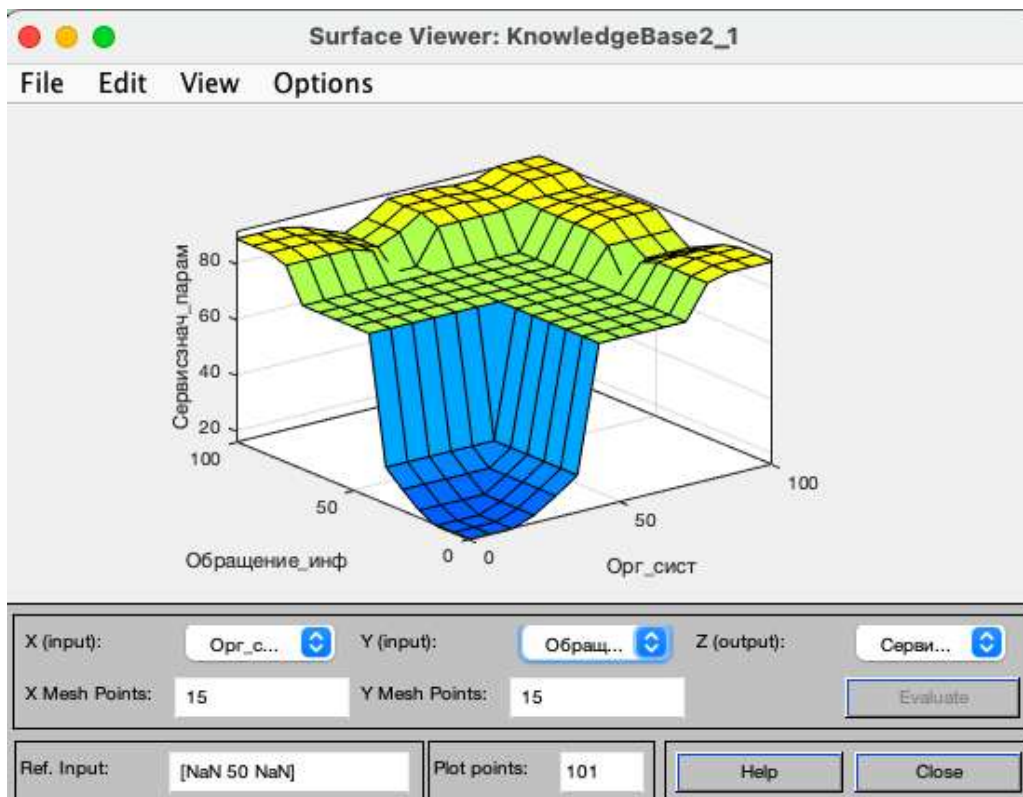
Этап 31 - Формирование терм множеств и параметров НЛВ



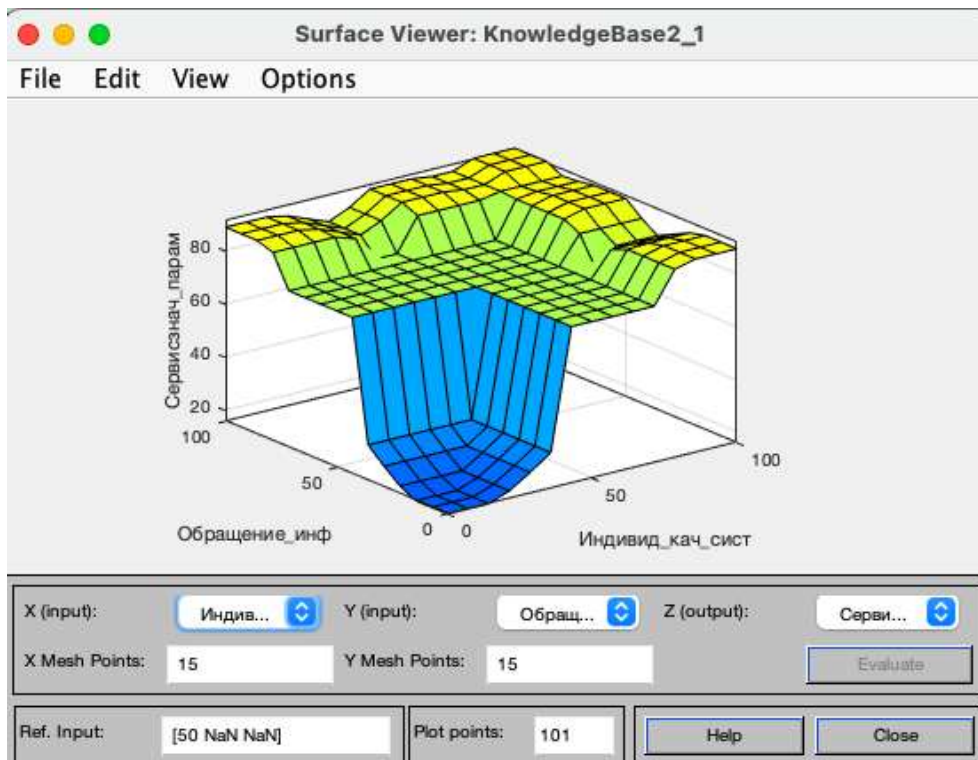
Этап 32 - Функции принадлежности выходных терм-множеств критерия «Сервисзначимые параметры»



Этап 33 - Визуализация поверхности «Организационная система», «Индивидуальные качества системы» - «Сервисзначимые параметры»



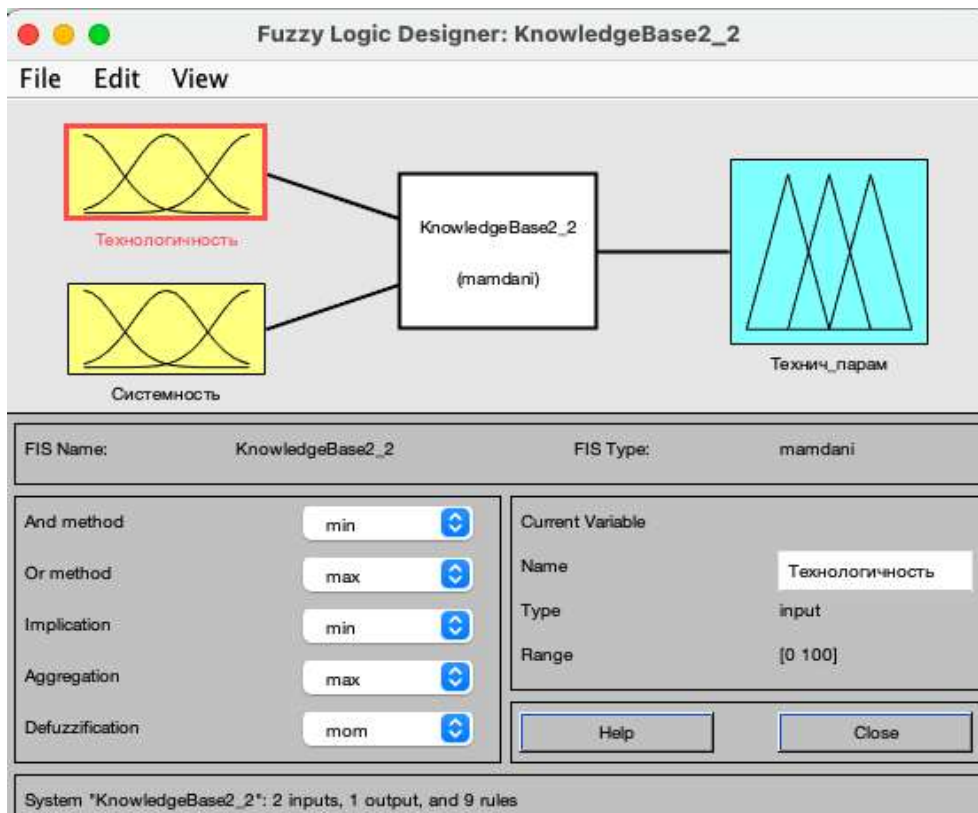
Этап 34 - Визуализация поверхности «Организационная система», «Обращение информации» - «Сервисзначимые параметры»



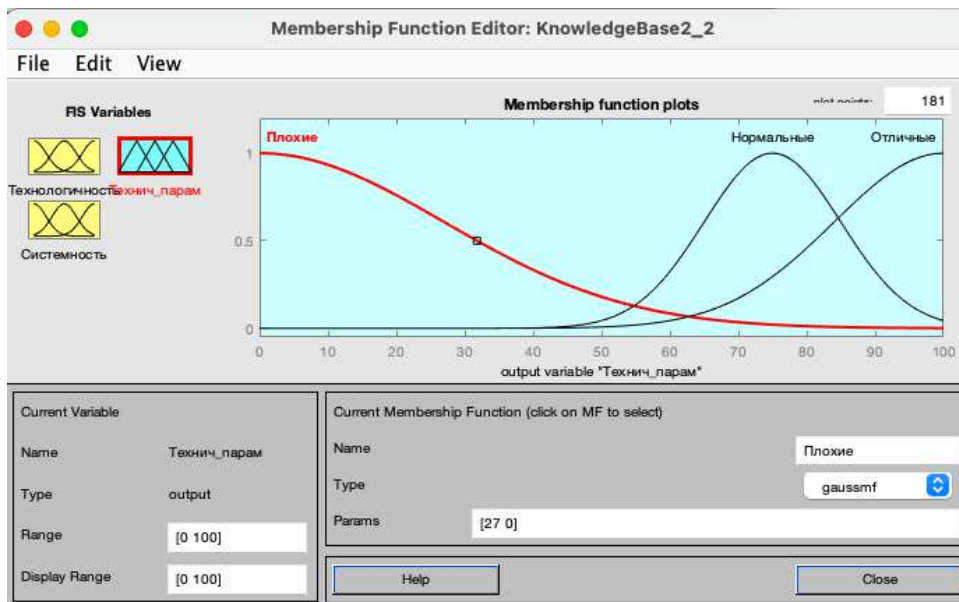
Этап 35 - Визуализация поверхности «Индивидуальные качества системы»,
«Обращение информации» - «Сервисзначимые параметры»

База знаний: 27 правил.

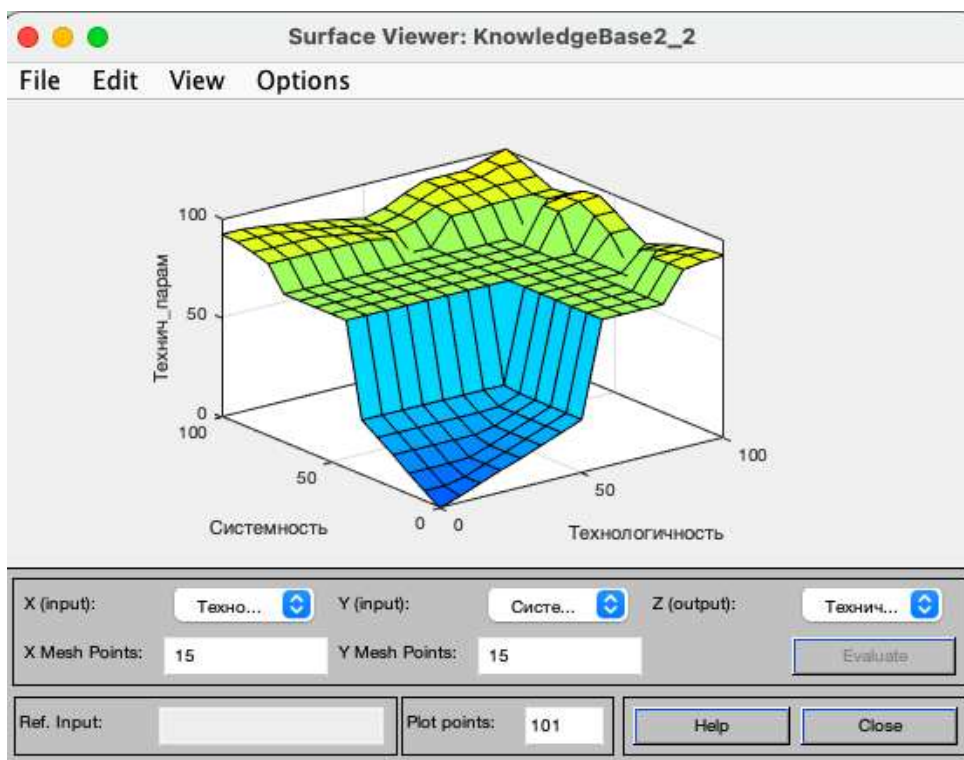
В.7. Блок 2.2 (Технологичность, Системность → Технические параметры)



Этап 36 - Формирование терм множеств и параметров НЛВ



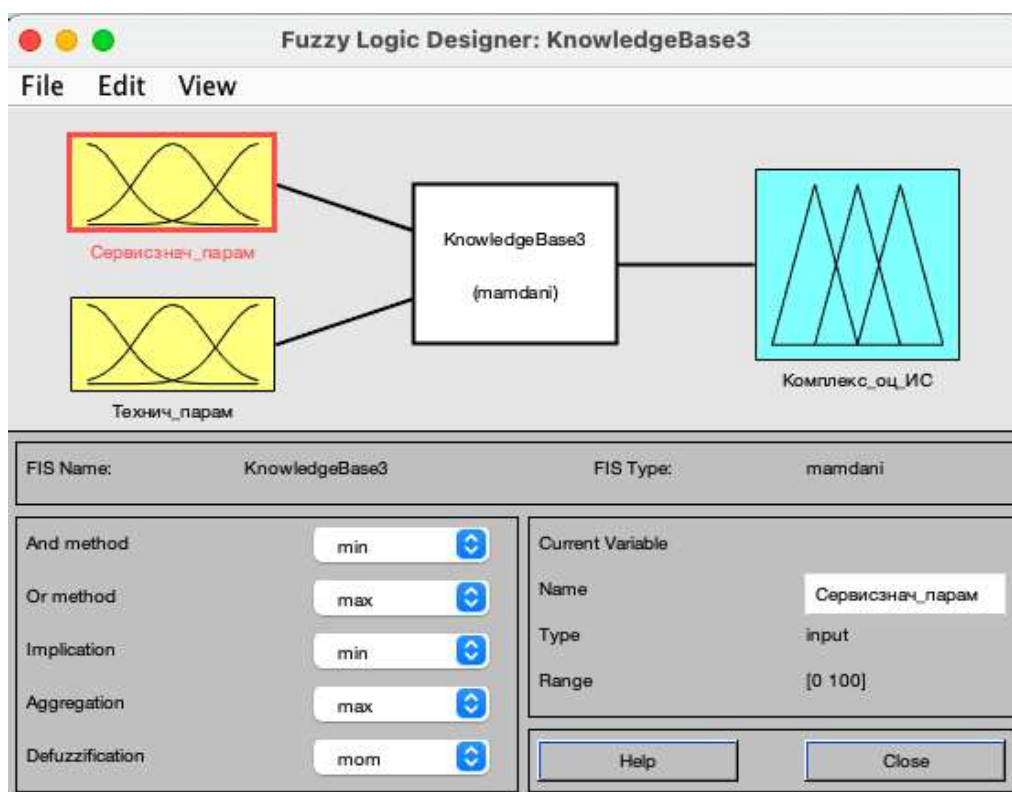
Этап 37 - Функции принадлежности выходных терм-множеств критерия «Технические параметры»



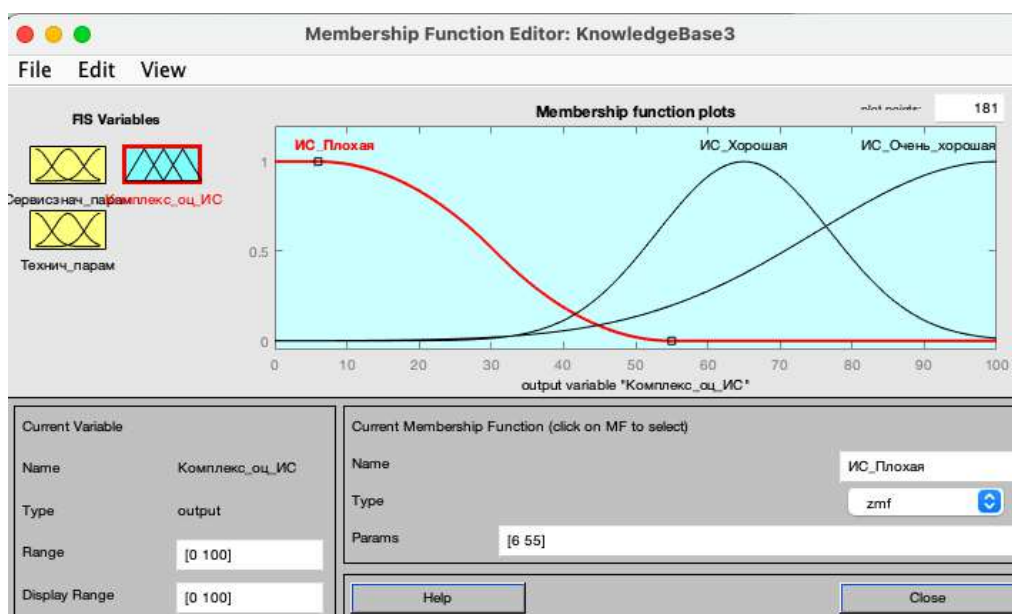
Этап 38 - Визуализация поверхности «Технологичность», «Системность» - «Технические параметры»

Файл НЛВ: KnowledgeBase2_2.fis

В.8. Блок 3.1 (Сервисзначимые параметры, Технические параметры → Комплексная оценка СУ)

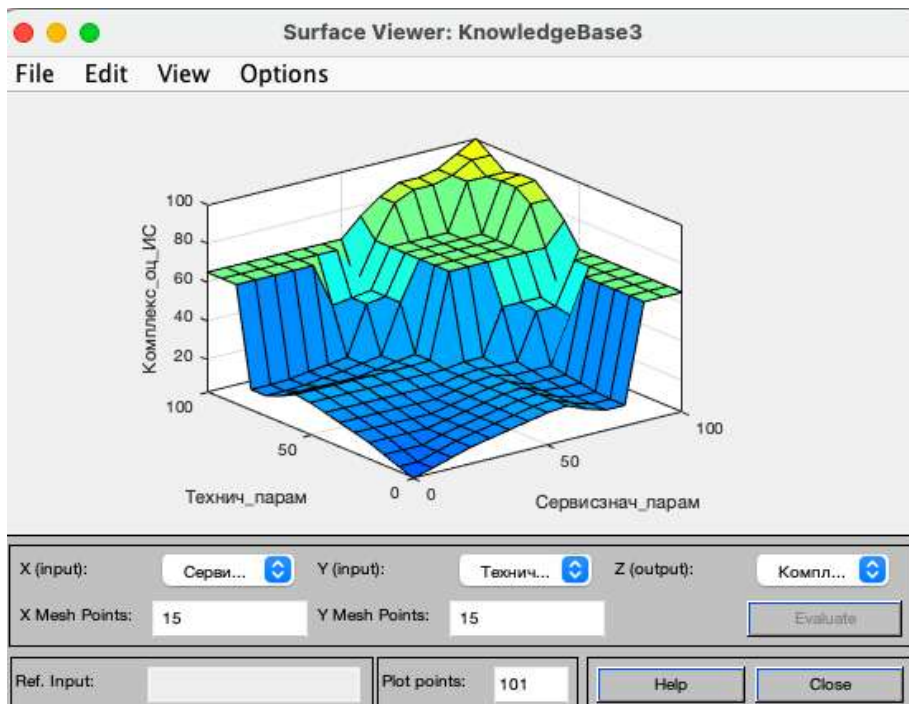


Этап 39 – Формирование терм-множеств и параметров НЛВ.



Этап 36 – Функции принадлежности выходного терм-множества «Комплексная оценка СУ»

Терм	Range	Type	Params
Плохая	[0, 100]	zmf	[0, 50]
Хорошая	[0, 100]	gaussmf	[15, 70]
Очень хорошая	[0, 100]	gaussmf	[15, 90]



Этап 37 – Визуализация поверхности отклика.

В.10. Листинги основных скриптов

Листинг В.1 – Фрагмент главного скрипта MainScript.m:

```
% Загрузка данных из Excel
data = readmatrix('ToR.xlsx');
% Инициализация массива результатов
results = zeros(60, 1);
% Цикл по респондентам
for i = 1:60
    % Дефаззификация нечетких критериев
    stress_clear = defuzzifyStress(data(i, 2));
    satisfaction_clear = defuzzifySatisfaction(data(i, 3));
    % Запуск модели Simulink
    sim('Work_sim.slx');

    % Запись результата
    results(i) = complexScore;
end
% Вычисление средней оценки
meanScore = mean(results);
fprintf('Комплексная оценка СУ: %.1f баллов\n', meanScore);
```

Листинг В.2 – Фрагмент вспомогательного скрипта CurveF1.m (дефаззификация уровня стресса):

```
function clearValue = defuzzifyStress(fuzzyValue)
    % Построение функций принадлежности в Curve Fitting Toolbox
    fitLow = fittype('gaussmf', 'Lower', 60, 'Upper', 120, 'Params', [10, 70]);
    fitMed = fittype('gaussmf', 'Lower', 60, 'Upper', 120, 'Params', [10, 90]);
```

```

fitHigh = fittype('gaussmf', 'Lower', 60, 'Upper', 120, 'Params', [10, 110]);
% Поиск пересечений и дефаззификация
clearValue = findIntersection(fuzzyValue, fitLow, fitMed, fitHigh);
end

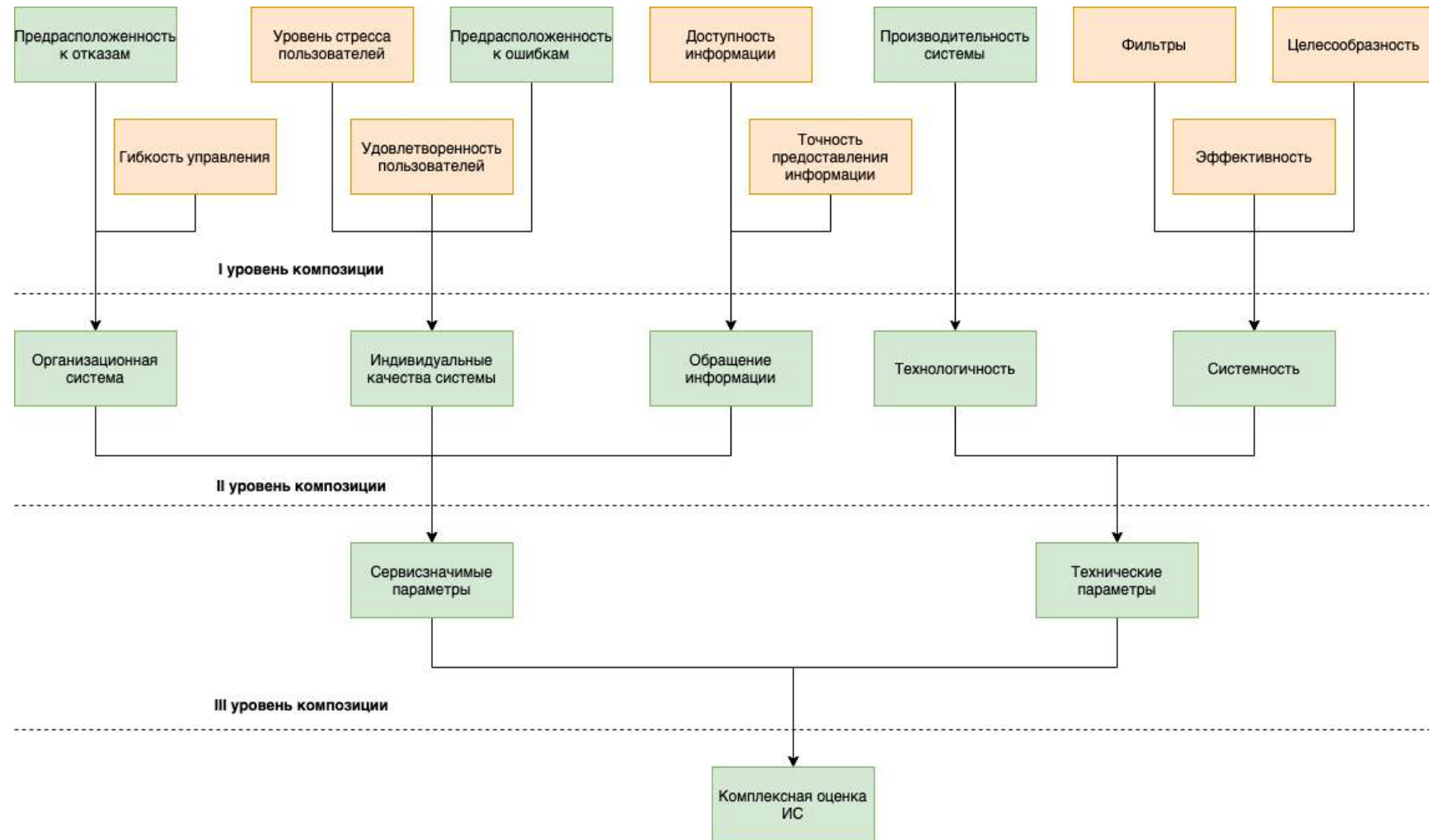
```

В.11. Дополнительные результаты

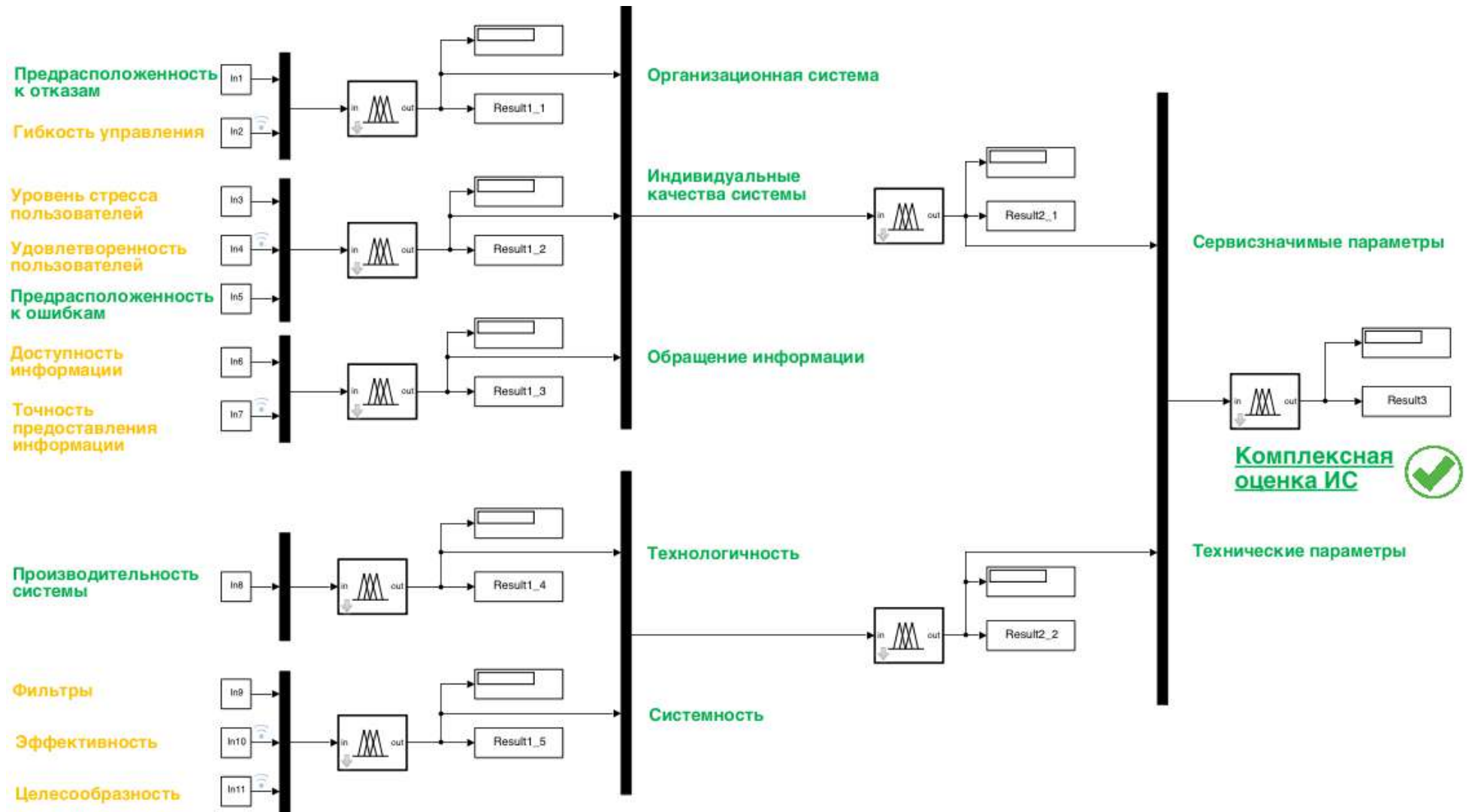
Таблица В.2 – Распределение комплексной оценки по респондентам:

Диапазон оценки	Количество респондентов	Доля, %
90–100	28	46,7
80–89	22	36,7
70–79	8	13,3
60–69	2	3,3
<60	0	0,0

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. КАСКАДНАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ



ПРИЛОЖЕНИЕ Д. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КРИТЕРИЕВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В SIMULINK



ПРИЛОЖЕНИЕ Е. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Таблица Г.1

Предрасп. к отк. (число отк.)	Гиб- кость упр.	Уровень стресса поль- зователей	Удовлетворен- ность пользова- телей	Предрасп. к ош. (число ош.)	Доступ- ность ин- формации	Точность предост. инф.	Произ- вод. си- стемы	Филь- тры	Эф- фек- тив- ность	Целесо- образ- ность
1	Отлич- ная	Невысокий	Хорошая	3	Хорошая	Отличная	8	Очень хо- рошо	Хоро- шая	Очень хорошо
2	Пло- хая	Средний	Очень низкая	1	Очень хо- рошая	Ненор- мальная	10	Хо- рошо	Сред- няя	Очень плохо
0	Очень хоро- шая	Невысокий	Низкая	2	Очень пло- хая	Отличная	7	Нор- мальн о	Низкая	Нор- мально
2	Ненор- маль- ная	Хороший	Высокая	2	Ненормаль- ная	Плохая	8	Нор- мальн о	Низкая	От- лично
1	Пло- хая	Невысокий	Средняя	2	Хорошая	Очень хо- рошая	9	Плохо	Высо- кая	Ненор- мально
1	Нор- маль- ная	Низкий	Невысокая	3	Нормаль- ная	Ненор- мальная	9	От- лично	Низкая	Очень хорошо
0	Нор- маль- ная	Высокий	Очень низкая	0	Ненормаль- ная	Отличная	8	Хо- рошо	Невы- сокая	От- лично
0	Отлич- ная	Очень низкий	Средняя	3	Нормаль- ная	Нормаль- ная	9	Нор- мальн о	Сред- няя	Ненор- мально

Предрасп. к отк. (число отк.)	Гиб- кость упр.	Уровень стресса поль- зователей	Удовлетворен- ность пользова- телей	Предрасп. к ош. (число ош.)	Доступ- ность ин- формации	Точность предост. инф.	Произ- вод. си- стемы	Филь- тры	Эф- фек- тив- ность	Целесо- образ- ность
2	Отлич- ная	Высокий	Средняя	1	Отличная	Очень плохая	9	Очень плохо	Высо- кая	Плохо
2	Очень плохая	Очень низкий	Невысокая	3	Отличная	Отличная	9	Нор- мальн о	Низкая	Нор- мально
1	Очень хоро- шая	Невысокий	Высокая	1	Отличная	Очень плохая	9	Не- нор- мальн о	Сред- няя	От- лично
2	Пло- хая	Хороший	Хорошая	1	Плохая	Отличная	10	Хо- рошо	Хоро- шая	Нор- мально
1	Нор- маль- ная	Высокий	Хорошая	2	Отличная	Очень плохая	9	Хо- рошо	Сред- няя	Очень плохо
1	Нор- маль- ная	Хороший	Невысокая	2	Ненормаль- ная	Ненор- мальная	7	Нор- мальн о	Невы- сокая	От- лично
2	Хоро- шая	Низкий	Невысокая	3	Плохая	Плохая	8	Плохо	Высо- кая	От- лично
0	Пло- хая	Низкий	Низкая	0	Хорошая	Отличная	9	Хо- рошо	Невы- сокая	Нор- мально
1	Ненор- маль- ная	Невысокий	Очень низкая	1	Нормаль- ная	Хорошая	8	От- лично	Хоро- шая	Очень хорошо
2	Очень хоро- шая	Невысокий	Хорошая	2	Очень хо- рошая	Плохая	8	Хо- рошо	Очень низкая	Нор- мально

Предрасп. к отк. (число отк.)	Гиб- кость упр.	Уровень стресса поль- зователей	Удовлетворен- ность пользова- телей	Предрасп. к ош. (число ош.)	Доступ- ность ин- формации	Точность предост. инф.	Произ- вод. си- стемы	Филь- тры	Эф- фек- тив- ность	Целесо- образ- ность
3	Отлич- ная	Хороший	Средняя	3	Очень хо- рошая	Хорошая	8	Очень плохо	Хоро- шая	Очень хорошо
1	Очень хоро- шая	Очень низкий	Очень низкая	1	Нормаль- ная	Хорошая	9	Не- нор- мальн о	Сред- няя	От- лично
1	Отлич- ная	Очень низкий	Невысокая	1	Нормаль- ная	Хорошая	9	Нор- мальн о	Низкая	Очень хорошо
0	Нор- маль- ная	Хороший	Хорошая	2	Плохая	Плохая	10	Очень плохо	Высо- кая	Нор- мально
2	Нор- маль- ная	Очень низкий	Низкая	2	Нормаль- ная	Плохая	9	Нор- мальн о	Высо- кая	Очень плохо
2	Хоро- шая	Очень низкий	Средняя	2	Плохая	Очень хо- рошая	9	Очень хо- рошо	Высо- кая	От- лично
1	Пло- хая	Низкий	Средняя	4	Отличная	Плохая	10	Не- нор- мальн о	Низкая	Ненор- мально
0	Очень хоро- шая	Низкий	Невысокая	2	Ненормаль- ная	Отличная	9	Очень хо- рошо	Невы- сокая	Очень плохо

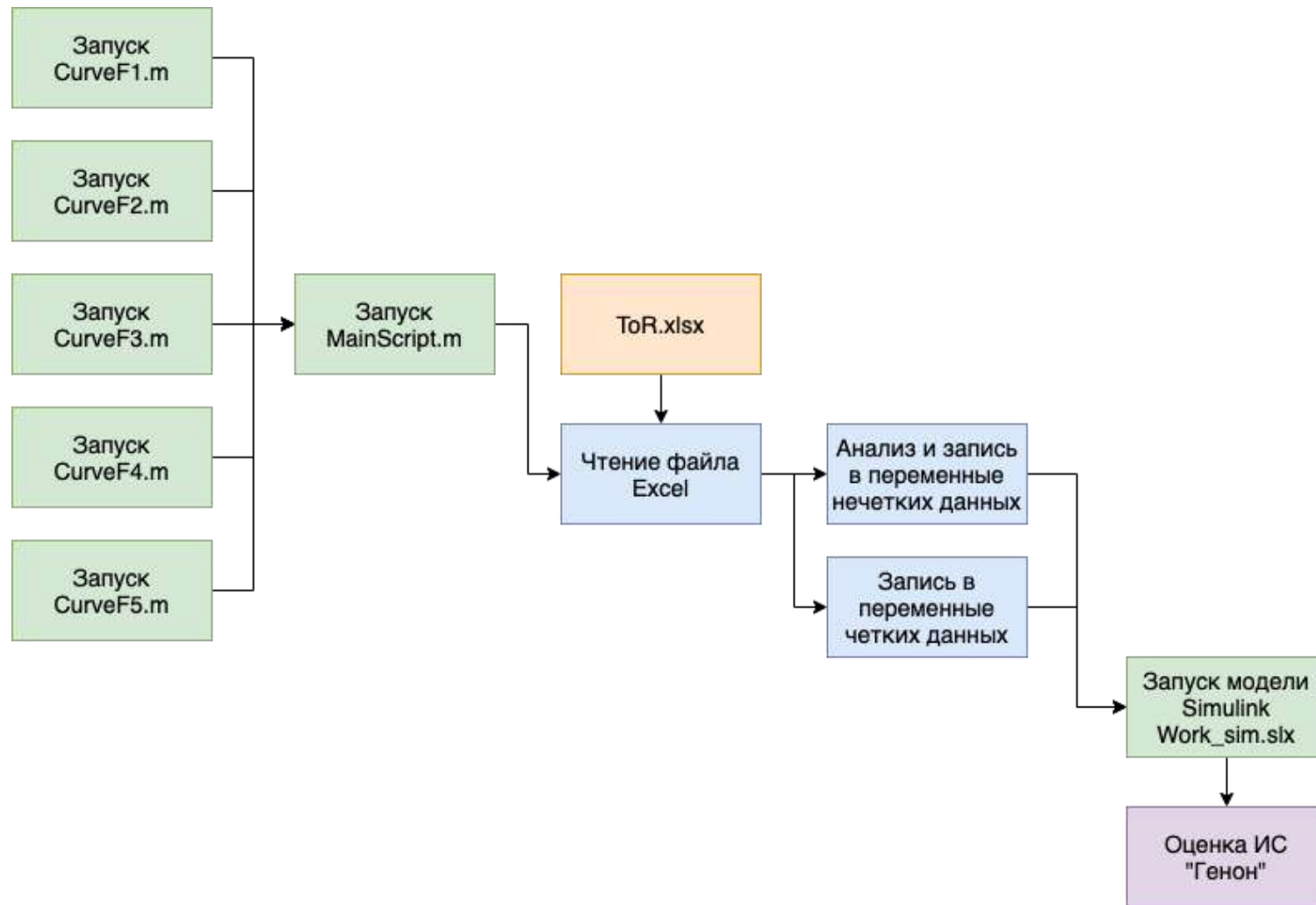
Предрасп. к отк. (число отк.)	Гиб- кость упр.	Уровень стресса поль- зователей	Удовлетворен- ность пользова- телей	Предрасп. к ош. (число ош.)	Доступ- ность ин- формации	Точность предост. инф.	Произ- вод. си- стемы	Филь- тры	Эф- фек- тив- ность	Целесо- образ- ность
2	Нор- маль- ная	Хороший	Очень низкая	4	Плохая	Отличная	9	Не- нор- мальн о	Хоро- шая	От- лично
2	Очень хоро- шая	Хороший	Низкая	1	Хорошая	Ненор- мальная	7	От- лично	Сред- няя	Очень хорошо
2	Хоро- шая	Высокий	Высокая	0	Нормаль- ная	Хорошая	9	Хо- рошо	Высо- кая	Хорошо
2	Очень плохая	Невысокий	Невысокая	3	Нормаль- ная	Хорошая	10	Плохо	Высо- кая	Плохо
2	Хоро- шая	Очень низкий	Низкая	0	Очень хо- рошая	Очень хо- рошая	7	Очень хо- рошо	Низкая	Очень хорошо
2	Нор- маль- ная	Низкий	Высокая	1	Отличная	Очень плохая	8	Нор- мальн о	Очень низкая	Очень плохо
0	Хоро- шая	Низкий	Очень низкая	1	Нормаль- ная	Отличная	8	Хо- рошо	Хоро- шая	Нор- мально
1	Очень плохая	Невысокий	Средняя	2	Очень пло- хая	Ненор- мальная	9	Не- нор- мальн о	Сред- няя	Очень хорошо
1	Отлич- ная	Очень низкий	Низкая	1	Нормаль- ная	Отличная	8	Очень плохо	Сред- няя	Ненор- мально
1	Нор- маль- ная	Невысокий	Высокая	2	Очень хо- рошая	Хорошая	9	От- лично	Сред- няя	От- лично

Предрасп. к отк. (число отк.)	Гиб- кость упр.	Уровень стресса поль- зователей	Удовлетворен- ность пользова- телей	Предрасп. к ош. (число ош.)	Доступ- ность ин- формации	Точность предост. инф.	Произ- вод. си- стемы	Филь- тры	Эф- фек- тив- ность	Целесо- образ- ность
1	Отлич- ная	Невысокий	Невысокая	1	Очень хо- рошая	Плохая	9	Хо- рошо	Высо- кая	Очень плохо
1	Ненор- маль- ная	Хороший	Средняя	0	Ненормаль- ная	Очень плохая	9	Очень плохо	Высо- кая	Плохо
2	Хоро- шая	Высокий	Невысокая	1	Отличная	Отличная	8	Не- нор- мальн о	Высо- кая	Очень плохо
2	Ненор- маль- ная	Средний	Низкая	0	Плохая	Хорошая	9	Очень хо- рошо	Высо- кая	Очень хорошо
2	Отлич- ная	Высокий	Хорошая	1	Нормаль- ная	Очень хо- рошая	7	Плохо	Сред- няя	Очень хорошо
2	Нор- маль- ная	Хороший	Хорошая	3	Нормаль- ная	Отличная	7	От- лично	Очень низкая	Очень хорошо
2	Ненор- маль- ная	Высокий	Невысокая	2	Отличная	Нормаль- ная	10	Хо- рошо	Сред- няя	Ненор- мально
0	Нор- маль- ная	Хороший	Высокая	1	Ненормаль- ная	Отличная	7	От- лично	Высо- кая	Плохо
1	Очень хоро- шая	Низкий	Низкая	0	Ненормаль- ная	Очень хо- рошая	9	Хо- рошо	Высо- кая	Нор- мально

Предрасп. к отк. (число отк.)	Гиб- кость упр.	Уровень стресса поль- зователей	Удовлетворен- ность пользова- телей	Предрасп. к ош. (число ош.)	Доступ- ность ин- формации	Точность предост. инф.	Произ- вод. си- стемы	Филь- тры	Эф- фек- тив- ность	Целесо- образ- ность
1	Ненор- маль- ная	Средний	Средняя	0	Отличная	Отличная	8	От- лично	Высо- кая	Плохо
1	Очень плохая	Очень низкий	Хорошая	0	Ненормаль- ная	Ненор- мальная	10	Нор- мальн о	Низкая	Очень хорошо
2	Ненор- маль- ная	Невысокий	Низкая	1	Плохая	Очень плохая	9	От- лично	Очень низкая	Очень хорошо
3	Очень плохая	Высокий	Невысокая	1	Хорошая	Плохая	9	Очень хо- рошо	Хоро- шая	Очень хорошо
2	Хоро- шая	Невысокий	Невысокая	1	Ненормаль- ная	Очень плохая	7	Хо- рошо	Очень низкая	Ненор- мально
1	Хоро- шая	Высокий	Высокая	2	Отличная	Отличная	9	От- лично	Высо- кая	Ненор- мально
2	Ненор- маль- ная	Хороший	Средняя	2	Хорошая	Ненор- мальная	8	Не- нор- мальн о	Высо- кая	Нор- мально
1	Пло- хая	Высокий	Невысокая	2	Хорошая	Очень плохая	9	Очень хо- рошо	Хоро- шая	От- лично
2	Ненор- маль- ная	Высокий	Невысокая	1	Отличная	Нормаль- ная	9	От- лично	Сред- няя	Очень хорошо

Предрасп. к отк. (число отк.)	Гиб- кость упр.	Уровень стресса поль- зователей	Удовлетворен- ность пользова- телей	Предрасп. к ош. (число ош.)	Доступ- ность ин- формации	Точность предост. инф.	Произ- вод. си- стемы	Филь- тры	Эф- фек- тив- ность	Целесо- образ- ность
1	Ненор- маль- ная	Средний	Низкая	3	Нормаль- ная	Очень хо- рошая	9	Очень хо- рошо	Высо- кая	Очень хорошо
1	Пло- хая	Невысокий	Низкая	1	Плохая	Плохая	7	Нор- мальн о	Хоро- шая	От- лично
1	Ненор- маль- ная	Очень низкий	Невысокая	0	Хорошая	Очень плохая	10	Не- нор- мальн о	Высо- кая	Очень хорошо
1	Отлич- ная	Хороший	Невысокая	0	Очень хо- рошая	Отличная	10	Очень хо- рошо	Невы- сокая	Плохо
1	Пло- хая	Высокий	Хорошая	1	Нормаль- ная	Очень хо- рошая	9	Нор- мальн о	Высо- кая	Хорошо
1	Нор- маль- ная	Высокий	Высокая	2	Отличная	Ненор- мальная	9	От- лично	Хоро- шая	Хорошо

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА



ПРИЛОЖЕНИЕ И. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Data:

$H_order = \{H_order^{(1)}, H_order^{(2)}, \dots\}$ – множество холонов заказов,
 $H_resource = \{H_resource^{(1)}, H_resource^{(2)}, \dots\}$ – множество ресурсных холонов,
 $H_product = \{H_product^{(1)}, H_product^{(2)}, \dots\}$ – множество продуктовых холонов,
 $H_workshop = \{H_workshop^{(1)}, H_workshop^{(2)}, \dots\}$ – множество холонов цеха,
 $H_HMS = \{H_HMS^{(1)}, H_HMS^{(2)}, \dots\}$ – множество HMS,
 $H_DWH = \{H_DWH^{(1)}, H_DWH^{(2)}, \dots\}$ – множество DWH,
 R – количество требований к СУ,
 N – среднее количество точек заказа,
 T_max – ограничение по времени работы алгоритмов,
 S_max – максимально допустимый уровень стресса (ЧСС),
 $P_threshold$ – порог вероятности безотказной работы,
 w_Q, w_T, w_L, w_M, w_P – весовые коэффициенты критериев

Result: C* – выбранная оптимальная конфигурация СУ

```
// =====
// Этап 1: Оценка альтернативных холонов методом нечеткой логики
// =====
1  foreach H_i in H_order ∪ H_resource ∪ H_product ∪ H_workshop ∪ H_HMS ∪ H_DWH do
2      // Внешний уровень: семантический анализ, эргономика
3      S_stress_i ← FuzzyEval(H_i.S_stress); // НЛВ: "Низкий", "Средний", "Высокий"
4      S_sat_i ← FuzzyEval(H_i.S_sat); // НЛВ: "Низкая", "Средняя", "Высокая"
5      I_avail_i ← FuzzyEval(H_i.I_avail); // НЛВ: "Плохая", "Нормальная", "Отличная"
6      I_acc_i ← FuzzyEval(H_i.I_acc); // НЛВ: "Плохая", "Нормальная", "Отличная"
7      F_flex_i ← FuzzyEval(H_i.F_flex); // НЛВ: "Плохая", "Нормальная", "Отличная"
8
9      // Концептуальный уровень: эффективность алгоритмов
10     E_alg_i ← FuzzyEval(H_i.E_alg); // НЛВ: "Низкая", "Средняя", "Высокая"
11     T_alg_i ← PredictTime(H_i.A_alg, N); // Из раздела 4.2: T_A(N)
12     L_route_i ← PredictLength(H_i.A_alg, N); // Из раздела 4.2: L_A(N)
13     M_alg_i ← PredictMemory(H_i.A_alg, N); // Из раздела 4.2: M_A(N)
14
15     // Внутренний уровень: надежность, производительность
16     P_reliab_i ← CalculateReliability(H_i); // Из раздела 4.5: P(t)
17     P_perf_i ← H_i.P_perf; // Четкий: операций/сек
18
19     // Каскадная схема НЛВ (раздел 4.3)
20     Q_i ← CascadedFuzzyInference(
21         S_stress_i, S_sat_i, I_avail_i, I_acc_i, F_flex_i,
22         E_alg_i, P_reliab_i, P_perf_i
23     ); // Комплексная оценка холона (баллы, 0–100)
24     H_i.Q ← Q_i;
25
26 // =====
27 // Этап 2: Формирование множества всех возможных конфигураций
28 // =====
29 C ← ∅;
30 foreach H_order in H_order do
31     foreach H_resource in H_resource do
32         foreach H_product in H_product do
33             foreach H_workshop in H_workshop do
```

```

31         foreach H_HMS in H_HMS do
32             foreach H_DWH in H_DWH do
33                 C_add ← (H_order, H_resource, H_product,
34                     H_workshop, H_HMS, H_DWH);
35                 C ← C ∪ {C_add};
36
37 // =====
38 // Этап 3: Предварительный отбор по Парето
39 // =====
40 C_Pareto ← ∅;
41 foreach C_j in C do
42     // Расчет критериев для конфигурации
43     Q_total_j ← Σ(H_i.Q for H_i in C_j); // Суммарная оценка холонов
44     T_total_j ← Σ(H_i.T_alg for H_i in C_j); // Общее время алгоритмов
45     L_total_j ← Σ(H_i.L_route for H_i in C_j); // Суммарная длина маршрутов
46     M_total_j ← Σ(H_i.M_alg for H_i in C_j); // Общий объем памяти
47     P_reliab_j ← Π(H_i.P_reliab for H_i in C_j); // Вероятность безотказной работы
48     C_j.criteria ← (Q_total_j, T_total_j, L_total_j, M_total_j, P_reliab_j);
49
50 // Проверка на доминирование
51 dominated ← false;
52 foreach C_k in C_Pareto do
53     if C_k dominates C_j then // C_k лучше или равна по всем критериям
54         dominated ← true;
55         break;
56     else if C_j dominates C_k then // C_j лучше C_k
57         C_Pareto ← C_Pareto \ {C_k}; // Удалить доминируемую
58
59 if not dominated then
60     C_Pareto ← C_Pareto ∪ {C_j};
61
62 // =====
63 // Этап 4: Выбор оптимальной конфигурации из множества Парето
64 // =====
65 F_max ← -∞;
66 foreach C_j in C_Pareto do
67     // Нормирование критериев
68     Q_norm ← (C_j.Q_total - Q_min) / (Q_max - Q_min);
69     T_norm ← (C_j.T_total - T_min) / (T_max - T_min);
70     L_norm ← (C_j.L_total - L_min) / (L_max - L_min);
71     M_norm ← (C_j.M_total - M_min) / (M_max - M_min);
72     P_norm ← (C_j.P_reliab - P_min) / (P_max - P_min);
73
74 // Целевая функция (формула 4.X+3)
75 F_j ← w_Q · Q_norm - w_T · T_norm - w_L · L_norm - w_M · M_norm + w_P · P_norm;
76
77 if F_j > F_max then
78     F_max ← F_j;
79     C* ← C_j;
80
81 // =====
82 // Этап 5: Мониторинг и адаптивное переключение конфигураций
83 // =====
84 while SystemRunning do
85     // Мониторинг внешних параметров
86     R_curr ← GetCurrentRequirementsCount();

```

```

78  N_curr ← GetCurrentAverageOrderPoints();
79  S_curr ← MonitorUserStress(); // ЧСС, айтрекинг (раздел 4.1)
80  T_curr ← MonitorAlgorithmTime();
81  P_curr ← CalculateCurrentReliability(C*);
82
83  // Проверка условий переключения (формулы 4.X+6 – 4.X+9)
84  if R_curr > R_max(C*) then
85      // Условие 1: рост количества требований
86      C_candidates ← {C in C_Pareto | R_max(C) >= R_curr};
87      if C_candidates ≠ ∅ then
88          C* ← SelectMaxF(C_candidates); // Выбрать с макс. F(C)
89
90  else if N_curr > N_max(C*) then
91      // Условие 2: рост количества точек заказа
92      C_candidates ← {C in C_Pareto | N_max(C) >= N_curr};
93      if C_candidates ≠ ∅ then
94          C* ← SelectMaxF(C_candidates);
95
96  else if S_curr > S_max then
97      // Условие 3: ухудшение эргономики (ЧСС > 100 уд./мин)
98      C_candidates ← {C in C_Pareto | HasParetoOptimizedUI(C)};
99      if C_candidates ≠ ∅ then
100         C* ← SelectMaxF(C_candidates);
101
102  else if T_curr > 1.2 · T_max then
103      // Условие 4: превышение времени работы алгоритмов
104      C_candidates ← {C in C_Pareto | T_total(C) <= 0.8 · T_curr};
105      if C_candidates ≠ ∅ then
106          C* ← SelectMaxF(C_candidates);
107
108  else if P_curr < P_threshold then
109      // Условие 5: снижение надежности
110      C_candidates ← {C in C_Pareto | P_reliab(C) >= P_threshold};
111      if C_candidates ≠ ∅ then
112          C* ← SelectMaxF(C_candidates);
113
114  // Динамическая переконфигурация СУ
115  if C* changed then
116      ReconfigureSystem(C*); // Замена холонов, перезапуск алгоритмов
117
118  sleep(Δt); // Интервал мониторинга (например, 60 сек)
119
120  return C*;

```

ПРИЛОЖЕНИЕ К. ПРАВИЛА ВЫБОРА МЕТОДА НОРМАЛИЗАЦИИ

Правило	Условие	Рекомендуемый метод нормализации
R_1	$\gamma_j = 1$, установлены нормативные или технологические границы	Нормирование по эталону
R_2	Выбросы отсутствуют, распределение не имеет выраженной асимметрии, требуется шкала $[0; 1]$	Min-max-нормализация
R_3	Показатель количественный, имеет различные масштабы, а задача сформулирована через отклонение от среднего	Z-нормализация
R_4	$\delta_{out,j} > 0,05$, выраженная асимметрия или тяжелые хвосты	Робастное масштабирование или робастная стандартизация
R_5	Требуется ограничить влияние экстремальных значений или задать нелинейную шкалу	Сигмоидная нормализация
R_6	Требуется только устранить сдвиг относительно среднего значения	Нормализация по среднему
R_7	Критерий имеет экспертную, интервальную или нечеткую форму	Нормализация функций принадлежности
R_8	Критерий имеет порядковую или бинарную шкалу	Ранговое или бинарное отображение

ПРИЛОЖЕНИЕ Л. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ АРХИТЕКТУРЫ СУ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РИСКА

Сценарий	Конфигурация	K_r	$P_{бр}(t)$	$T_{м.о.}, ч$	$P_{оч}$
r_1	a_1	0,985	0,970	1200	0,012
r_2	a_2	0,982	0,965	1150	0,015
r_2	a_1	0,960	0,920	950	0,045
r_2	a_2	0,970	0,940	1050	0,030
r_3	a_1	0,950	0,900	880	0,060
r_3	a_2	0,965	0,930	1000	0,040
r_4	a_1	0,930	0,860	750	0,090
r_4	a_2	0,955	0,910	920	0,055
r_4	a_1	0,910	0,820	680	0,120
r_5	a_2	0,945	0,890	870	0,070

ПРИЛОЖЕНИЕ М. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ПАО «ГАЗПРОМ АВТОМАТИЗАЦИЯ»



Публичное акционерное общество
«Газпром автоматизация»
(ПАО «Газпром автоматизация»)

ул. Кирпичные Выемки, д. 3, помещ. VI, ком. 21,
вн. тер. г. м. о. Чертаново Южное, г. Москва, Российская Федерация, 117405
Адрес для корреспонденции: ул. Верейская, д. 29, стр. 134, г. Москва,
Российская Федерация, 121357
тел.: +7 (499) 580-41-40, факс: +7 (499) 580-41-36
e-mail: gazauto@gazprom-auto.ru, www.gazprom-auto.ru
ОКПО 00159093, ОГРН 1027700055360, ИНН 7704028125, КПП 997450001

№ _____
на № _____ от _____

Акт внедрения результатов диссертационной работы

В процессе внедрения материалов диссертационной работы Скворцовой Д.А., представленной на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: «Методология организации систем управления машиностроительным производством», были выполнены следующие этапы: оценка цифровой зрелости информационной инфраструктуры; разработка система управления, основанная на холонической архитектуре; внедрена платформы для мониторинга показателей защищенности и эффективности систем управления.

Сформированы рекомендации по этапности внедрения холонической системы управления, приоритетам модернизации существующих информационных систем, настройке подсистем мониторинга и аналитической отчетности. Модели архитектуры, СППР и аналитическая платформа были использованы для выбора конфигурации системы управления, учитывающей реальные ограничения по ресурсам и требованиям к времени отклика.

Первый заместитель генерального
директора - главный инженер



И.К. Денисов

Шульман Е.В.
+7 (499) 766-44-44 доб. 23-65
e.shulman@gazprom-auto.ru



ПРИЛОЖЕНИЕ Н. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В ОАО «ОРБИТА»



АО "ОРБИТА"

Юр. (почтовый) адрес: ул. Пешо-Стрелецкая, 88, офис 25, 394038, Воронеж, Россия
 тел/факс +7 (473) 263-2124, факс +7 (473) 239-1261
 Web: www.orbitaenv.ru E-mail: info@orbitaenv.ru
 ОГРН 1093668041312 ОКПО 70713339 ИНН/КПП 3664099994/366401001



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «Орбита»

Романов О.П.

«27» мая 202 6 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов диссертационной работы

В процессе внедрения материалов диссертационной работы Скворцовой Д.А., представленной на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Методология организации систем управления машиностроительным производством» результаты работы применены: при разработке и тестировании аналитической платформы на базе Qlik Sense для задач мониторинга информационной безопасности и управления уязвимостями; при оптимизации интерфейсов и отчетных форм в соответствии с эргатическими критериями, полученными в диссертации.

Использованы методика формализации требований на основе текстов пользователей и регламентов, расчет 20 расчетных показателей для оценки защищенности, эффективности сканирования, управления активами и соответствия стандартам. По данным пилотного проекта время решения типовых задач анализа инфраструктуры и управления уязвимостями сократилось в среднем в несколько раз (2,81–17,72 раза в зависимости от масштаба объекта); повысилась полнота и регулярность контроля состояния информационной инфраструктуры. В результате оптимизации и повышения качества и надежности системы управления на предприятии достигнут экономический эффект в размере 0,8 млн. рублей в год.

Генеральный директор
(должность)

подпись

/О.П. Романов
ФИО

ПРИЛОЖЕНИЕ П. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В ООО «ГЕНОН»

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

Общества с ограниченной ответственностью

«ГЕНОН»

Чмырь Д.А.

2026 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы

Материалы диссертационной работы Скворцовой Д.А., представленной на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «МЕТОДОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ» были использованы в деятельности компании ООО «ГЕНОН» при модернизации внутреннего уровня архитектуры системы управления, связанного с базами данных и SQL-запросами; при оптимизации стоимости и времени выполнения запросов; при оценке и повышении надежности системы управления с учетом человеческого фактора. Даны рекомендации по структуре запросов, индексации, конфигурации памяти и мониторингу медленных запросов. Так же предложена модель надежности с учетом стрессовых показателей оператора, используемая для формирования требований к интерфейсу и режимам работы. Методология, показанная в работе, позволила повысить эффективность работ, тем самым подтвердив правоту результатов диссертационного исследования. Процент внедрения на предприятии составил порядка 70%, что свидетельствует о широком охвате ключевых процессов и подсистем.

Генеральный директор

(должность)



ПОДПИСЬ

ФИО

Чмырь Д.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Р. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по учебной работе
МГТУ им. Н. Э. Баумана
С.В. Альков

« 28 » 2026 г.

**Акт
внедрения результатов диссертационной работы
Скворцовой Дарьи Александровны на тему:
«Методология организации систем управления машиностроительным
производством»**

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Скворцовой Дарьи Александровны используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» при подготовке обучающихся по направлениям подготовки 27.03.05 Инноватика (уровень бакалавриата), 27.04.07 Наукоемкие технологии и экономика инноваций (уровень магистратуры), 27.04.06 Организация и управление наукоемкими производствами (уровень магистратуры).

Декан факультета ИБМ,
к.т.н., к.э.н.

И.Д. Сидельников