

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»

На правах рукописи



Шевнина Юлия Сергеевна

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ
ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие
системы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
д.т.н., проф. Гагарина Л.Г.

Москва 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ, МОДЕЛЕЙ И СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ	18
1.1 Характеристические особенности и проблемы производственных процессов в микро- и нанoeлектронике с учетом нелинейности	18
1.2 Исследование существующих моделей нелинейных систем различной сложности	29
1.3 Аналитический обзор современных математических методов решения для различных моделей нелинейных систем	33
1.4 Аналитический обзор существующих способов представления состояния нелинейных систем	37
1.5 Анализ существующих средств обработки информации в информационно-измерительных и управляющих системах с учетом нелинейности	46
1.6 Постановка задачи диссертационной работы	50
Выводы по главе 1	54
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ИЕРАРХИЧНОСТИ КОМПОНЕНТОВ	56
2.1 Разработка принципов иерархического построения компонентов информационно-измерительных и управляющих систем как объектов управления с заданными граничными условиями	56
2.2 Разработка теоретических подходов к техническим решениям создания ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники с использованием процессного подхода и положений теории систем	63
2.3 Разработка обобщенной математической модели информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для	

микро- и наноэлектроники	69
2.4 Разработка модифицированного метода оценки управляемости и наблюдаемости информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и наноэлектроники	79
2.5 Разработка алгоритма управления устойчивостью информационно-измерительной и управляющей системой с предварительным анализом характеристик системы для инициализации детерминированного хаоса	82
Выводы по главе 2	91
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	93
3.1 Разработка математической модели граничных состояний информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и наноэлектроники	93
3.2 Разработка математической модели изменения состояния информационно-измерительной и управляющей системы при внешнем управляющем воздействии	96
3.3 Разработка алгоритма анализа и прогнозирования изменения состояния информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и наноэлектроники	100
3.4 Разработка алгоритма принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей информационно-измерительной и управляющей системы	117
Выводы по главе 3	128
ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	130

4.1 Особенности и характеристики взаимодействия объектов информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники	130
4.2 Разработка процессных моделей интерфейсов информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники	136
4.3 Разработка математических моделей поведения информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами в микро- и наноэлектронике в исключительных ситуациях	143
4.4 Разработка методики построения информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники	163
Выводы по главе 4	166
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В ВИДЕ СМАРТ-КОМПОНЕНТА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	168
5.1 Разработка архитектуры информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом со смарт-компонентом	168
5.2 Оценка состояния информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и наноэлектроники на основе методов машинного обучения	177
5.3 Автоматический поиск решения в информационно-измерительной и управляющей системе производственным процессом для микро- и наноэлектроники	189
5.4 Оценка точности прогноза динамики поведения информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом	199
Выводы по главе 5	204
ГЛАВА 6. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ	

РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	205
6.1 Практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы для производственной линии изготовления микроэлектронных компонентов на кремниевых пластинах 200 мм	205
6.2 Практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы для контроля поверхностных дефектов изделий микроэлектроники	210
6.3 Практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы для процесса нанолитографии	222
6.4 Практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы для электронной лабораторной среды для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования	236
6.5 Экспериментальные исследования и оценка эффективности полученных результатов для различных предметных областей	263
Выводы по главе 6	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	268
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	272
Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационной работы	304
Приложение Б. Инструкция по работе с информационно-измерительной и управляющей системой для процесса нанолитографии	314
Приложение В. Фрагмент программного кода модуля анализа и прогнозирования изменения состояния информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и нанoeлектроники	332

ВВЕДЕНИЕ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современные информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС) для микро- и наноэлектроники (МНЭ) постоянно усложняются, возникает необходимость учета большого количества параметров и факторов, в том числе нелинейных. Кроме того, совокупная обработка накопленных во время эксплуатации ИИУС данных о производстве позволяет повысить эффективность принятия оперативных и стратегических решений при управлении производством [1-7].

Научные исследования в области повышения управляемости современных ИИУС проводятся как за рубежом, так и в нашей стране – имена Видьясагар М., Исидоре А., Хассан К. Халил, Кучмин А.Ю., Жуков В.М., Пряничников В.Е., а также Андреев В.П., Королев П.Г., Жулев В.И., Муромцев Д.Ю., Вышлов В.А., Минаков Е.И. хорошо известны широкой научной общественности [8-25].

Одним из перспективных направлений развития этой области является применение в ИИУС для микро- и наноэлектроники методов нелинейной динамики для обработки измеряемой информации о совокупности параметров производства (рис.1).

По данным Центра компетенций по импортозамещению в сфере информационно-коммуникационных технологий объем ИИУС для микро- и наноэлектроники, использующих нелинейные методы и модели представления производственных процессов на российском рынке за прошедшие два года увеличился на 11,9% и составил 4,2 млрд. рублей [26, 27]. Ожидается рост объема таких ИИУС в среднем на 12,5% в год. Кроме этого, использование нелинейных моделей в составе ИИУС предприятий МНЭ позволяет снизить производственный цикл на 9%, заметно сократить потери и брак выпускаемых изделий [27-29]. Однако, для повышения эффективности использования методов нелинейной динамики требуются дополнительные исследования по обработке взаимозависимых нелинейных данных [8, 11, 15, 22], поскольку по данным

Минпромторга ключевыми проблемами отрасли являются отставание технологий на 10–15 лет от мирового уровня; высокая зависимость процессов проектирования и выпуска продукции от зарубежных технологий; сложности с освоением технологических процессов ниже 180 нм; дефицит производственных мощностей; нехватка персонала; невозможность обеспечить рынок необходимой электроникой; низкая инвестиционная привлекательность; высокая стоимость производства компонентов в России; недобросовестная конкуренция со стороны зарубежных поставщиков электроники. Кроме того, отмечается высокий уровень брака (более 50%) не только на этапе отладки производства, но и на серийной стадии, обусловленный износом и моральным старением оборудования и отсутствием необходимого опыта у сотрудников [30, 31]. Таким образом, нелинейность перечисленных составляющих становится критическим параметром, особенно с учетом человеческого фактора. Следует также отметить, что нелинейные зависимости между параметрами процессов, их большое количество, а также внешние воздействия могут привести к потере устойчивости ИИУС и ухудшению качества управления производством.

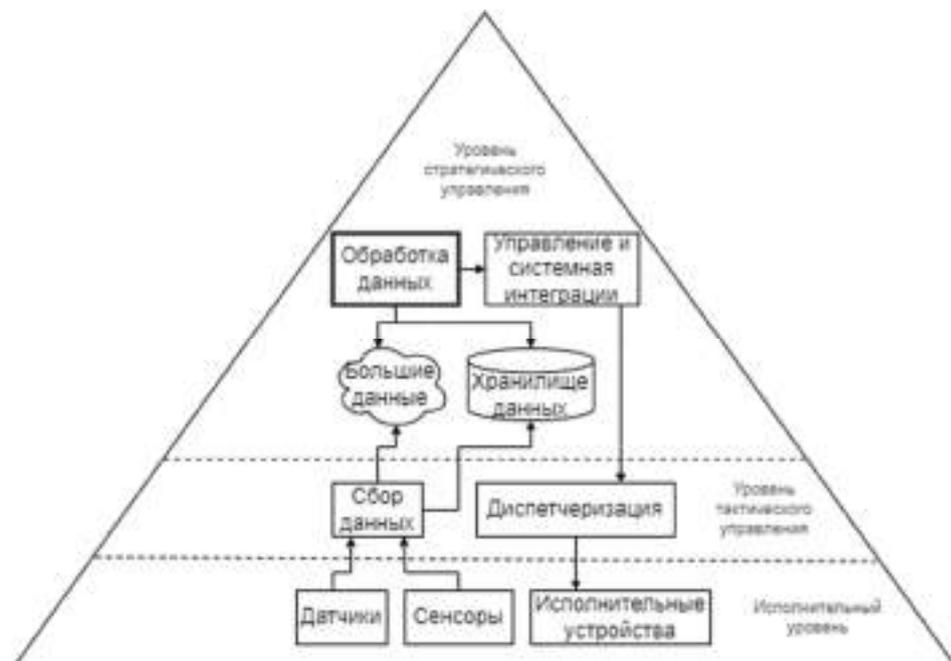


Рис.1. Обобщенная схема ИИУС предприятия

Вопросам нелинейной динамики посвятили свои труды известные зарубежные и русские ученые и инженеры Дж.Д. Биркгоф, И.Р. Пригожин, Г. Хакен, W. Freeman, J. Kelso, Н.Е. Жуковский, Л.И. Мандельштам, Н.Н. Боголюбов, А.Н. Колмогоров, В.Н. Рубановский, В.И. Арнольд, Ю.С. Ильяшенко, С.П. Капица, А.М. Ляпунов, Г.Г. Малинецкий, Н.В. Кузнецов и др. [32-48]

Однако отсутствие единых методологических подходов к построению ИИУС различной сложности с учетом нелинейности производственной среды, состояния исполнительных механизмов и оборудования, человеческого фактора, порождает *проблемную ситуацию*: существующие математические модели и методы обработки измеряемой информации о совокупности параметров производства не позволяют с требуемой точностью оценить состояние управляемого процесса и, следовательно, принимать эффективные управленческие решения. Причинами проблемной ситуации являются упрощение и потеря полноты представления ИИУС, исключение из рассмотрения взаимозависимости параметров как в общем, так и в частных случаях, а также линеаризация нелинейных составляющих внешнего воздействия и внутреннего контура систем.

Таким образом, исследования, направленные на развитие теоретических основ разработки моделей состояния, прогнозирования поведения управляемого процесса, новых методов принятия решения для построения эффективных ИИУС, сочетающих преимущества различных подходов, в том числе нелинейной динамики, повышающих устойчивость и управляемость ИИУС, являются весьма *своевременными и актуальными*.

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований является производственный процесс микро- и наноэлектроники.

Предметом исследований являются модели, алгоритмы и методики создания информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами.

ЦЕЛЬЮ ДИССЕРТАЦИИ является повышение управляемости информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и нанoeлектроники на основе применения формального аппарата нелинейной динамики.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор существующих методов, моделей и средств обработки информации в современных ИИУС.

2. Разработка теоретических подходов к техническим решениям построения ИИУС.

3. Разработка обобщенной математической модели ИИУС на основе формального аппарата теории хаоса в приложении к состоянию процесса управления в терминах объектно-ориентированной парадигмы.

4. Разработка алгоритма управления устойчивостью ИИУС на основе анализа характеристик системы для инициации детерминированного хаоса с целью достижения состояния устойчивого.

5. Разработка математического описания граничных состояний ИИУС, условий их наступления и динамики изменения состояния системы при внешнем управляющем воздействии.

6. Разработка алгоритма анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС, обеспечивающего условия формирования и корректировки управляющего воздействия.

7. Разработка алгоритма принятия решения при условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей ИИУС.

8. Разработка методики построения ИИУС на основе разработанных моделей и алгоритмов.

9. Разработка технического решения на основе предложенных моделей, алгоритмов и методики в виде смарт-компонента, входящего в состав ИИУС.

10. Экспериментальные исследования, верификация и оценка эффективности полученных результатов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для достижения поставленной цели и решения задач диссертационной работы использовались методы математического и системного анализа, теории информации, теории множеств и графов, теории автоматического управления, теории дифференциальных уравнений, дискретной математики, нелинейной динамики, объектно-ориентированного анализа и проектирования.

Для оценки достоверности разработанных моделей, алгоритмов и методики применялись методы информационного поиска, имитационного моделирования, методы теоретического исследования и постановки эксперимента.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ. Диссертационная работа представляет собой совокупность научно обоснованных теоретических и технических разработок, направленных на повышение управляемости ИИУС для МНЭ за счет высокой точности оценки состояния ИИУС и прогноза ее поведения на основе методов нелинейной динамики. В процессе исследований и разработок получены следующие новые научные результаты:

1. Предложены новые теоретические подходы к техническим решениям создания ИИУС, отличающиеся научно обоснованным иерархическим построением компонентов системы как объектов управления с заданными граничными условиями, определением связей между ними и управляющих воздействий.

2. Разработана новая обобщенная математическая модель ИИУС на основе формального аппарата теории хаоса в приложении к состоянию процесса управления в терминах объектно-ориентированной парадигмы, которая отличается тем, что позволяет определять динамику поведения системы в любой момент времени.

3. Впервые разработан алгоритм управления устойчивостью ИИУС с предварительным анализом характеристик системы для инициации детерминированного хаоса с целью достижения состояния устойчивого, значительно повышающего управляемость системы.

4. Впервые разработана математическая модель граничных состояний

ИИУС, условий их наступления и динамики изменения состояния системы при внешнем управляющем воздействии, позволяющая оценить управляемость и наблюдаемость ИИУС как в целом, так и покомпонентно.

5. Предложен алгоритм анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС, отличающийся наличием условий формирования и корректировки управляющего воздействия, предусматривающий сопоставление текущих характеристик ИИУС с накопленными ранее характеристиками наблюдаемого или референтного процесса.

6. Впервые разработан алгоритм принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей ИИУС, который позволяет уменьшить количество альтернатив, снизить неопределенность и значительно повысить управляемость ИИУС.

7. На основе предложенных моделей и алгоритмов разработана методика построения ИИУС, отличающаяся учетом специфики конкретной ИИУС с точки зрения назначения, ограничений и нелинейности, что позволяет значительно упростить исследования характеристических свойств ИИУС.

8. Предложено новое техническое решение с применением методов нелинейной динамики на основе разработанных в диссертации моделей, алгоритмов и методики в виде смарт-компонента, входящего в состав ИИУС, отличающееся тем, что обеспечивает повышение управляемости системы, визуализации характеристик и компонентов для оценки состояния системы и прогноза ее динамики.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ заключается в том, что основные положения, выводы и рекомендации ориентированы на широкое применение предложенных моделей, алгоритмов и методики построения ИИУС для МНЭ, для создания цифровых двойников, разработки интеллектуальных систем прогнозирования, рекомендаций и принятия решений в различных предметных областях. Кроме того, значимость результатов диссертации заключается в улучшении технических и функциональных характеристик со-

временных ИИУС при решении практических задач с использованием представленных в работе моделей и алгоритмов на основе формального аппарата нелинейной динамики и принятия решений в условиях неопределенности. Исследования доведены до конкретной методики, обеспечивающей повышение эффективности разработки и исследования характеристических свойств ИИУС в 2 раза, а также до конкретной программной реализации. Результаты анализа научного эксперимента подтверждают повышение управляемости ИИУС, в состав которой по сравнению с традиционными входит смарт-компонент, учитывающий назначение, нелинейность и внутренние связи конкретной ИИУС.

Разработанные алгоритмы интегрированы в визуальный прототип ИИУС при реализации облика отечественного нанолитографа (НИР «Разработка установки безмасочной рентгеновской нанолитографии на основе МЭМС динамической маски для формирования наноструктур с размерами от 13 нм и ниже на базе синхротронного и/или плазменного источника»), благодаря чему управляемость совмещения и экспонирования элементов изделия возросла на 48%, а управляемость процессом на 36%. Разработанные модели и алгоритмы обеспечивают оценку состояния ИИУС и прогноз динамики ее поведения с точностью более 90%. Полученные результаты позволяют на 50% эффективнее традиционных способов разрабатывать ИИУС с требуемыми характеристиками для различных предметных областей.

Результаты диссертационной работы используются в вузовских дисциплинах «Теория систем и системный анализ», «Функциональное и логическое программирование», «Разработка программного обеспечения информационных систем», «Программная инженерия управляющих систем», «Проектирование и архитектура программных систем».

Все работы по реализации и внедрению проводились под руководством или при непосредственном участии автора.

Практическая значимость подтверждена рядом актов внедрения результатов диссертационной работы, в том числе, в АО «Микрон», ООО «НМ-Тех»,

ООО «ИММЕРС», ООО «ЭВМКомплект», ООО «Просенсор Сервис», НИУ МИЭТ, НОЧУ ВО МУППИ.

ДОСТОВЕРНОСТЬ НОВЫХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ подтверждается:

1) оценочными критериями, тождественностью теоретических и экспериментальных результатов;

2) разработкой теоретических положений на известных, проверяемых данных, согласуемых с опубликованными сведениями по теме диссертации;

3) доказательством повышения точности прогнозирования состояния ИИУС, полученным в процессе верификации результатов и соответствующим предварительной теоретической оценке.

4) успешным внедрением программной реализации разработанных моделей, алгоритмов и методики в виде смарт-компонента на предприятиях микроэлектроники - АО «Микрон», ООО «НМ-Тех», ООО «ИММЕРС», ООО «ЭВМКомплект», ООО «Просенсор Сервис», а также НИУ МИЭТ, НОЧУ ВО МУППИ.

б) практической апробацией смарт-компонента в составе ИИУС при реализации облика отечественного нанолитографа.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. Все основные результаты диссертационной работы получены автором лично. Главными из них являются:

- формализация технических решений построения ИИУС на основе математического аппарата теории хаоса в терминах объектно-ориентированной парадигмы;

- разработка алгоритма управления устойчивостью ИИУС на основе предварительного анализа характеристик системы и прогнозирования ее девиаций с целью инициации детерминированного хаоса для повышения устойчивости, т.е. эффективности функционирования ИИУС;

- разработка математической модели условий наступления граничных состояний ИИУС с учетом динамики изменения общего состояния системы при внешнем воздействии с целью оценки управляемости и наблюдаемости, в том числе и компонентов ИИУС;

- разработка алгоритма прогнозирования состояния ИИУС, обеспечивающего условия формирования и корректировки управляющего воздействия на основе сравнения текущих характеристик ИИУС с пороговыми значениями из базы данных мониторинга наблюдаемого или референтного процесса;
- разработка алгоритма принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом характеристик и целей ИИУС, который позволяет значительно повысить эффективность принятия решения, уменьшая количество альтернатив.
- разработка методики построения ИИУС на основе предложенных моделей и алгоритмов с учетом назначения, ограничений и нелинейной динамики конкретной ИИУС;
- разработка нового технического решения с применением методов нелинейной динамики на основе предложенных в диссертации моделей, алгоритмов и методики в виде смарт-компонента, входящего в состав ИИУС.

Автор диссертации принимал непосредственное участие в разработке, в экспериментах и внедрении результатов исследований. В работах в соавторстве автору принадлежит не менее 80% результатов.

Автор диссертации является лауреатом премии Правительства РФ в области образования за 2010 год за инновационную разработку «Программно-методический комплекс для создания электронных образовательных сред, управления учебным процессом и индивидуальной работой обучающихся». Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 октября 2010 г. № 1868-р г. Москвы.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планом научно-технических исследований института системной и программной инженерии и информационных технологий НИУ МИЭТ.

Работа являлась составной частью ряда НИР: 1) «Разработка и создание

универсальной открытой программно-аппаратной платформы для проектирования устройств обработки потокового видео для беспилотных летающих аппаратов мониторинга экологической ситуации и состояния природных объектов» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2021 годы»; 2) проекта «Приоритет 2030»; 3) «Разработка установки безмасочной рентгеновской нанолитографии на основе МЭМС динамической маски для формирования наноструктур с размерами от 13 нм и ниже на базе синхротронного и/или плазменного источника», 4) «Выполнение работ по подготовке документации эскизно-технического проекта на операционную систему защищенной микросхемы для SIM-карты».

Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс ряда предприятий, в том числе, АО «Микрон», ООО «НМ-Тех», ООО «ИММЕРС», ООО «ЭВМКомплект», ООО «Просенсор Сервис», НИУ МИЭТ, НОЧУ МУППИ в рамках опытной эксплуатации.

Предложенные в работе модели и алгоритмы используются в учебном процессе института СПИНТех НИУ МИЭТ.

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Обобщенная математическая модель ИИУС, разработанная на основе формального аппарата теории хаоса и описывающая процесс управления в терминах объектно-ориентированной парадигмы с учетом иерархического построения компонентов системы в качестве объектов управления с заданными граничными условиями и связями между ними, которая позволяет определять динамику поведения системы в любой момент времени.

2. Алгоритм управления устойчивостью ИИУС на основе предварительного анализа характеристик системы и прогнозирования ее девиаций, который обеспечивает повышение управляемости ИИУС на 36% путем инициации элементов детерминированного хаоса.

3. Математическая модель определения условий наступления граничных состояний ИИУС с учетом динамики изменения общего состояния системы

при внешнем управляющем воздействии, позволяющая осуществлять оценку управляемости и наблюдаемости как всей системы, так и ее компонентов.

4. Алгоритм прогнозирования состояния ИИУС, осуществляющий сравнение текущих характеристик ИИУС с пороговыми значениями из базы данных мониторинга наблюдаемого или референтного процесса с целью оценки состояния ИИУС, который обеспечивает формирование и корректировку управляющего воздействия для повышения управляемости системы на основе прогнозирования динамики ее поведения с точностью 90%.

5. Алгоритм принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом характеристик и назначения ИИУС, который позволяет значительно улучшить качество решения за счет уменьшения количества альтернатив.

6. Методика построения ИИУС на основе предложенных теоретических подходов, разработанных математических моделей и алгоритмов, которая позволяет в 2 раза повысить эффективность разработки и исследования конкретной ИИУС с учетом ее назначения, ограничений и нелинейности внешних и внутренних характеристик.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на **30** всероссийских и международных конференциях, в т.ч.: Международной научно-практической конференции «Индустрия 4.0» (Сочи, 2024); Международной научно-технической конференции «Автоматизация» (Сочи, 2023); Российском форуме «Микроэлектроника-2023»; Международной научной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения» (Смоленск, 2022, 2023, 2024); III Международной научно-практической конференции «Диалог культур. Культура диалога: цифровые коммуникации» (Москва, 2022); SAMSTech-II 2021: Современные достижения в области материаловедения и технологий (Красноярск, 2021); APITECH-III - 2021: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг (Красноярск, 2021); International Scientific Forum on Sustainable De-

velopment and Innovation (Красноярск, 2021); IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRus) (Москва, 2021); Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции «Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки» (Омск, 2021); Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции (RCDL'2006) (Суздаль, 2006); Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии» (Пенза, 2006); Международной научно-методической конференции «Новые информационные технологии в университетском образовании» (Кемерово, 2006).

Автор принимала участие в составлении 5 научно-технических отчетов по НИР. Научная новизна полученных результатов работы подтверждена свидетельствами об официальной регистрации 16 программ для ЭВМ (№2021617601, №2022619223, №2022618445, №2022618378, №2022619755, №2022619038, №2022618974, №2022684307, №2022669637, №2022669636, №2022669635, №2023665089, №2023665088, №2023665037, №2023665090, №2024612516), зарегистрированных в РОСПАТЕНТ.

Материалы диссертации опубликованы в 99 печатных работах, из них 39 статей в рецензируемых журналах, в том числе индексируемых в Scopus, монографий – 4, результатов интеллектуальной деятельности - 16.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографии и приложений. Общий объем диссертации - 355 страницы, из них - 303 страницы основного текста, в том числе 66 рисунков, 9 таблиц. Библиография содержит 268 наименований на 32 страницах.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ, МОДЕЛЕЙ И СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

1.1 ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ

В настоящее время микро- и нанoeлектроника находит свое отражение практически во всех промышленных сферах и является одним из определяющих научно-технический прогресс и социальное развитие общества фактором. Начало развития микроэлектроники как области электроники, изучающей проблемы создания устройств в миниатюрном исполнении, приходится на 1960-е годы. В последние десятилетие рынок электронного оборудования развивается со скоростью 11% в год и уже превышает рынок автомобилей [29,30]. Исследователи отмечают резкое снижение себестоимости изделий микроэлектроники во второй половине XX века, которое сопровождалось распространением электроники в другие сферы деятельности. Следующий рост производства изделий микроэлектроники связан с увеличением диаметра полупроводниковых пластин при одновременном уменьшении минимального размера элементов интегральных схем с улучшением характеристических параметров. Такой скачок требовал решения большого комплекса сложных научно-технических задач на каждом этапе увеличения диаметра. В настоящее время освоено производство на пластинах диаметром 300 мм, кроме того, на некоторых предприятиях планируется переход на диаметры 400 и 450 мм [29-32].

Основным направлением развития микроэлектроники является уменьшение топологических норм транзисторных структур до нанометрового диапазона. Поскольку в нанoeлементах учитываются волновые функции, а не сами электроны как частицы, переход в нанодиапазон требует пересмотреть

физические основы работы устройств. В частности, характерные для микроэлектроники процессы дрейфа и диффузии в наноэлементах отсутствуют. Изменение физических основ работы элементов предполагает использование гетероструктур, наноструктурированных материалов, кластеров и органических материалов. Технология формирования наноструктур или инженерия волновых функций основана на процессах направленного роста, методах сканирующей туннельной микроскопии, атомной силовой микроскопии и требует разработки новых подходов к учету ряда нелинейных факторов [17, 21, 33].

По мнению экспертов, наноэлектроника представляет собой логическое продолжение микроэлектроники в области схемотехнических методов обработки информации и позволяет создавать устройства нового поколения на основе квантовых явлений и эффектов. Отмечается, что уменьшение толщины слоя оксида в транзисторе, длины канала приводит к квантованию поперечного движения с образованием квазидвумерного газа носителей заряда с увеличением их подвижности и туннельного тока, что в свою очередь, приводит к возникновению новых свойств по сравнению с традиционным полевым транзистором, выполненным по субмикронной технологии [32, 34, 35].

Отдельное внимание заслуживают параметры технологических процессов, а именно их изменчивость на всех этапах производственного цикла. Высокая прогнозируемость параметров приводит к повышению управляемости и устойчивости производства и, следовательно, к высокому проценту выхода годных. Указанный фактор зависит от совершенства технологий сбора и обработки данных, применяемых моделей и аналитических методов в составе ИИУС производственного процесса в микро- и наноэлектронике.

Качественная обработка данных в ИИУС позволит согласовывать различные этапы производственного процесса, внедрять новые подходы для снижения потребляемой мощности и повышения производительности изделий микроэлектроники в том числе с меньшими топологическими нормами. Все это позволит снизить стоимость разработки устройств и повысить их конку-

рентноспособность. По оценкам аналитического агентства Gartner, ряд современных изделий микроэлектроники имеет преимущества в соотношении рабочих характеристик, габаритов и потребляемой мощности в значительной степени за счет улучшения управления производственным процессом, а не за счет масштабирования размеров элементов интегральных схем [36-38].

Повышение эффективности управления производственным процессом происходит за счет использования новых методов обработки параметров с учетом их нелинейности и взаимозависимости, прогностических моделей изменения состояния и проведения производства. Для сбора информации используется большое количество датчиков и исторические данные, собранные в базах данных и знаний. Кроме того, использование методов нелинейной динамики при управлении производством позволяет выявлять образование дефектов изделий микроэлектроники на ранних стадиях, исследовать причины их возникновения [37].

Таким образом, производственные процессы в микро- и наноэлектронике имеют ряд характеристических особенностей и проблем, связанных с их нелинейностью:

- использование нанометровых технологий и тенденция к миниатюризации изделий требует крайне высокой точности и контроля при производстве. Даже незначительные изменения в параметрах процесса оказывают существенное влияние на качество и производительность конечного продукта.

- многие процессы в микро- и наноэлектронике нелинейны по своей природе. В частности, при увеличении мощности или времени облучения в процессе литографии возникает нелинейное поведение материалов, что затрудняет предсказание результатов и требует дополнительной коррекции. Кроме того, чувствительность к начальным параметрам производственных процессов говорит об их хаотичности в терминах нелинейной динамики.

- как правило, в микро- и наноэлектронике один процесс оказывает влияние на другие, что создает сложности в управлении и контроле всего производственного цикла. В частности, изменения в процессе осаждения металла

могут повлиять на качество диффузии полупроводников.

- с увеличением плотности интеграции компонентов возрастают технологические ограничения, такие как эффекты краевых явлений, дифракция света в литографии, эффекты теплового расширения материалов и другие, что усложняет процессы производства.

- из-за нелинейности процессов в микроэлектронике управление качеством является сложной задачей. Точное контролирование параметров процессов и обратная связь требуют использования сложных алгоритмов и систем автоматизации.

- нелинейность процессов делает моделирование производственных циклов более трудоемким. Необходимость учета нелинейных эффектов требует разработки более сложных математических моделей и методов анализа.

Решение данных проблем влечет за собой постоянное совершенствование технологий, разработку новых методов контроля и управления процессами, а также использование эффективных алгоритмов повышения устойчивости производственных процессов в микро- и нанoeлектронике.

Министерство промышленности и торговли Российской Федерации разработало и представило стратегический документ по развитию отрасли микроэлектроники «Основы государственной политики России в области развития электронной промышленности на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу [39]. В данном документе выделены следующие ключевые проблемы отрасли:

- отставание технологий на 10–15 лет от мирового уровня;
- высокая зависимость процессов проектирования и выпуска продукции от зарубежных технологий;
- сложности с освоением технологических процессов ниже 180 нм;
- дефицит производственных мощностей;
- нехватка персонала;
- невозможность обеспечить рынок необходимой электроникой;
- низкая инвестиционная привлекательность;

- высокая стоимость производства компонентов в России;
- недобросовестная конкуренция со стороны зарубежных поставщиков электроники.

В качестве основных решений указанных проблем Минпромторг предлагает увеличить мощности и восстановить отрасль электронного машиностроения, отказаться от иностранных технологий при проектировании путем развития собственного научного и производственного потенциала.

Наличие указанной проблемы подтверждает тот факт, что в России корпусированием сложных микросхем и процессоров занимаются единицы компаний, среди которых GS Nanotech (входит в GS Group), Зеленоградский нанотехнологический центр, Воронежский завод полупроводниковых приборов, зеленоградское АО «ПКК Миландр», поскольку в основном данной задачей занимаются компании Юго-Восточной Азии [40-42], вследствие чего у российской компании «Байкал электроникс», перед которой поставлена задача к 2025 году выпускать до 600 тыс. процессоров в год, возникли трудности по переносу сборки процессоров на отечественные мощности. Уровень брака превышает 50% не только на этапе отладки производства, но и при серийном изготовлении процессоров. Среди причин эксперты выделяют моральный износ оборудования, отсутствие современных систем управления производством и необходимого опыта у сотрудников [42, 43].

Указанные характеристические особенности и проблемы микро- и нанoeлектроники имеют множество причин, среди которых следует отметить:

- отсутствие достаточных инвестиций в научно-исследовательскую деятельность, разработку новых технологий и модернизацию производственных мощностей приводит к замедлению темпов развития отечественной микро- и нанoeлектроники.

- устаревшее производственное оборудование не позволяет полноценно воспроизводить современные технологии микроэлектроники, что приводит к тому, что производство не соответствует мировым стандартам.

- отсутствие квалифицированных кадров, способных работать с передовыми технологиями приводит к ограничению возможностей внедрения новых инновационных разработок в производство.

- отсутствие трансфера передовых технологий и недостаточное сотрудничество с мировыми лидерами в области микро- и нанoeлектроники негативно сказывается на развитии отрасли.

Для дальнейшего развития и восстановления микроэлектронной промышленности и достижения технологического суверенитета в данной области необходимы серьезные усилия по модернизации производства, инвестированию в научные исследования, разработку и внедрение передовых технологий, а также развитие системы подготовки кадров. Кроме того, важно активное сотрудничество с мировыми лидерами в области микроэлектроники для обмена опытом и технологиями. Таким образом, нелинейность перечисленных составляющих становится критическим параметром, особенно с учетом человеческого фактора. Следует также отметить, что нелинейные зависимости между параметрами процессов, их большое количество, а также внешние воздействия могут привести к потере устойчивости ИИУС и ухудшению качества управления производством.

Таким образом, исследования, направленные на развитие теоретических основ разработки моделей состояния, прогнозирования поведения управляемого процесса, новых методов принятия решения для построения эффективных ИИУС производственных процессов для микро- и нанoeлектроники, сочетающих преимущества различных подходов, в том числе нелинейной динамики, повышающих устойчивость и управляемость ИИУС, являются весьма своевременными и актуальными.

Нелинейная динамика - это область науки, которая изучает поведение сложных систем, в которых взаимодействие между элементами приводит к нелинейным эффектам. В отличие от линейной, нелинейная динамика учитывает нелинейные взаимосвязи и эффекты, которые приводят к неожиданным и сложным результатам [44]. Нелинейная динамика используется для изучения

хаотических систем, турбулентности, колебаний и других сложных явлений. Формальный аппарат нелинейной динамики применяется для анализа и управления динамическими системами, механическими системы, электрическими цепями, системами управления и т.п. Это лишь небольшой список областей, где нелинейная динамика находит применение. Использование нелинейной динамики позволяет исследовать сложное поведение системы в целом и предсказать ее эволюцию во времени.

Преимущества нелинейной динамики включают возможность моделировать сложные системы с большей точностью, предсказывать и объяснять необычные и неожиданные явления, а также исследовать эмерджентное поведение системы - свойства системы в целом, которые не могут быть объяснены только изучением ее отдельных компонентов [45, 46].

Нелинейная система - это система, в которой взаимодействие между ее компонентами приводит к нелинейным эффектам и состояние зависит от совокупности внешних факторов в некоторые моменты времени и определяется системой дифференциальных уравнений различного порядка [46, 47]. В отличие от линейных систем, нелинейные системы не подчиняются принципу суперпозиции, что означает, что результат воздействия нескольких входных сигналов не является простым суммированием результатов воздействия каждого из сигналов по отдельности.

В отличие от линейных систем, где отклик пропорционален входному сигналу, в нелинейных системах отклик, как правило, является нелинейной функцией от входного сигнала или состояния системы. Для нелинейных систем характерны нелинейные динамические эффекты, включающие в себя хаотическое поведение, неустойчивость, колебания, бифуркации, эмерджентность, возникающую вследствие взаимодействия между отдельными компонентами системы. Из-за своей сложности нелинейные системы требуют дополнительного исследования и применения для анализа и моделирования сложных методов и подходов. Тем не менее, нелинейные системы широко распространены в природе, технике, экономике и других областях, и их изучение

имеет большое значение для понимания сложных явлений.

Математическое моделирование нелинейной системы требует использования различных методов и подходов. На первом этапе необходимо определить цель моделировать и сформулировать математическую модель, описывающую поведение системы и включающую уравнения, описывающие динамику системы, параметры, начальные условия. После определения математической модели следует исследовать полученные уравнения и их свойства. В частности, определение стационарных точек, линеаризацию в окрестности этих точек, анализ устойчивости [44, 45, 48-52].

Полученные математические модели во многих случаях не имеют аналитических решений, для получения частных решений используется конструктивный подход с элементами численных методов. После получения численного решения проводится исследование динамики системы, включая построение фазовых портретов, анализ бифуркаций, изучение хаоса, поведения системы вблизи стационарных точек. Завершающим этапом моделирования нелинейной системы является верификация и валидация полученной модели. В дальнейшем, разработанная математическая модель нелинейной системы используется для прогнозирования поведения системы и для разработки методов управления этим поведением. Следовательно, математическое моделирование нелинейных систем требует глубокого понимания математики, численных методов, а также специфики исследуемой системы.

Развитие математических моделей нелинейных систем - это важный аспект современной науки и техники, поскольку многие реальные системы демонстрируют нелинейное поведение. Одним из основных направлений развития является улучшение точности математических моделей нелинейных систем, что включает в себя разработку новых уравнений и подходов к их решению с учетом дополнительных факторов. Современные методы машинного обучения, такие как нейронные сети, глубокое обучение, широко используются для построения математических моделей нелинейных систем, в том числе для аппроксимации зависимостей.

Для описания простых механических систем часто используются математические модели, основанные на законах Ньютона и принципах сохранения энергии [40, 53-55]. В частности, для описания системы, которая колеблется вокруг равновесного положения, применяется модель гармонического осциллятора. Данная модель основана на законе Гука и уравнении второго закона Ньютона и описывает движение системы с помощью дифференциального уравнения второго порядка $x'' + \omega^2 x = 0$, где x - смещение от положения равновесия, ω - частота колебаний. Подобные модели описывают системы с высокой погрешностью, поскольку не учитывают трение, внешние воздействия, устойчивые и неустойчивые состояния, динамический хаос и другие виды нелинейности [56].

Проведенное исследование показало, что хаос является естественной формой развития динамических систем и, кроме того, является важным аспектом в вопросах моделирования поведения таких систем [55, 57, 58]. Известно, что хаос является одним из характерных свойств многих нелинейных систем. Следовательно, развитие математических моделей для описания хаотического поведения систем является актуальным направлением исследований.

Динамические системы, подверженные хаосу, чувствительны к начальным условиям, т.е. малые изменения в начальном состоянии системы приводят к существенно отличным траекториям развития системы [59-63]. Кроме того, хаотическое поведение системы описывается с применением аппарата нелинейной динамики и не может быть предсказано путем сложения или умножения входных сигналов. Вместо этого хаотические системы проявляют сложные поведенческие шаблоны, такие как периодические орбиты, интегральные аттракторы и турбулентность. Для хаотических систем характерна фрактальная структура, при которой поведение системы приобретает свойство самоподобия на различных уровнях детализации [64, 65].

Для моделирования сложных динамических систем, таких как хаотические, используется конструктивный подход с элементами численных методов

[60, 65-67]. Для определения функциональных зависимостей и значений коэффициентов применяются исходные данные о состоянии системы и окружающей среды. Рассмотренный подход к моделированию поведения динамических систем в настоящее время является наиболее распространенным и применяемым. Однако, данный подход не позволяет получить решения дифференциальных уравнений для систем с возможностью хаотического поведения, а также приводит к увеличению погрешности модели [68, 69].

Типовым ИИУС производственных процессов для микро- и наноэлектроники свойственны открытость, диссипативность, нелинейность (рис.1.1). На производственные процессы воздействует внешняя среда, что делает их открытыми системами. В процессе такого взаимодействия происходит получение информации из внешней среды (поставки сырья, изменения на рынках) и ответное воздействие на нее (выпуск готовой продукции). Данный факт требует постоянного мониторинга и адаптации системы к изменяющимся условиям. Кроме того, производственные процессы в микро- и наноэлектронике характеризуются диссипативностью. Это связано с термодинамическими процессами, такими как трение, теплопередача и диффузия. Диссипативность означает, что система должна постоянно компенсировать эти потери для поддержания стабильности и эффективности процесса. Практически все производственные процессы характеризуются нелинейными зависимостями между входными и выходными параметрами. Это может привести к неожиданным и сложным эффектам, таким как колебания, хаос или эмерджентное поведение. Управление такими системами требует специальных методов и стратегий, способных учитывать нелинейности и обеспечивать стабильную работу процесса.

Таким образом, возникает необходимость развития теоретических основ разработки моделей состояния, прогнозирования поведения управляемых производственных процессов для микро- и наноэлектроники, новых методов принятия решений для построения ИИУС с применением таких разделов нелинейной динамики, как теория устойчивости, теория динамического хаоса и теория интегрируемых систем [70, 71].

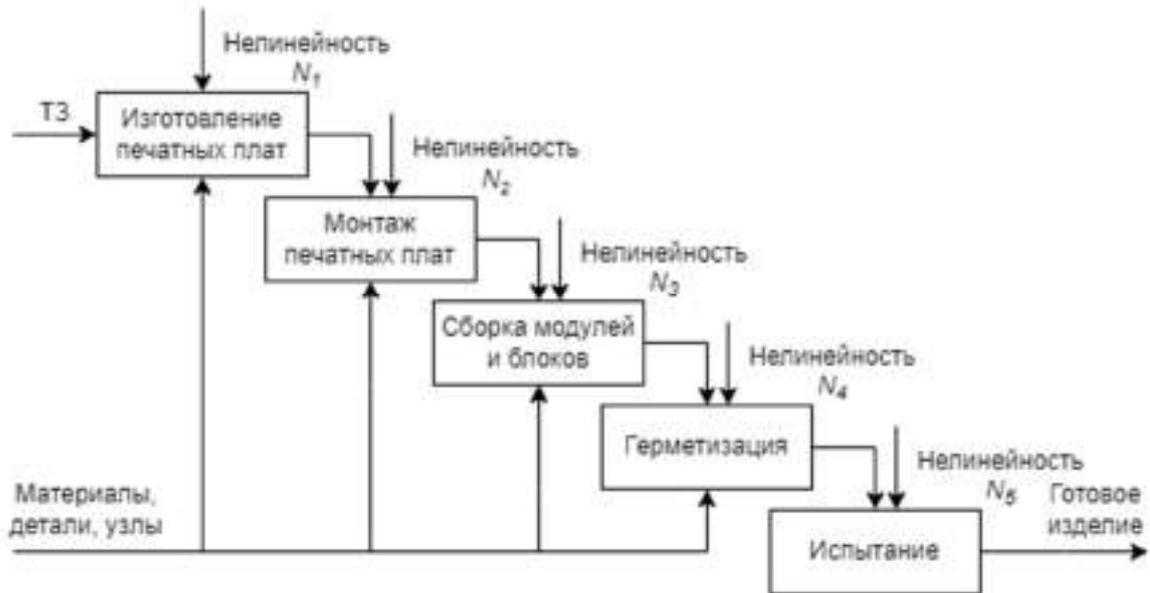


Рис.1.1. Производственный процесс в микроэлектронике с учетом нелинейности

Известно, что ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники являются нелинейными системами (НС), поскольку их состояние зависит от совокупности внешних факторов в некоторые моменты времени и определяется системой дифференциальных уравнений. Современный метод моделирования НС состоит в построении наиболее близкой к исследуемой системе механической модели, состояние которой описывается системой дифференциальных уравнений. Модели НС классифицируются по признакам, определяемым характеристиками самой системы и ее состояния.

Полученные в последние годы принципиально новые нетривиальные решения нелинейных задач в теории колебаний, синергетике, теории катастроф и бифуркаций, значительно расширили представления и область применения принципов нелинейной динамики, но задача учета хаотического поведения в модели динамической системы не получила решения и является по-прежнему актуальной [72-76].

1.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОЙ СЛОЖНОСТИ

Модели нелинейных систем классифицируются по различным признакам, определяемым характеристиками самой системы и ее состояния (рис.1.2).



Рис.1.2. Классификация моделей нелинейных систем

По нелинейности модели динамических систем делятся на линейные, квазилинейные и существенно нелинейные [75, 77-81]. Линейные модели позволили получить описания вынужденных колебательных процессов и явления резонанса. В процессе исследования данных моделей и соотнесения их решений с результатами экспериментов выявлена высокая погрешность представления динамической системы и существенное несоответствие эмпирически полученным данным даже для простейших механических и электромеханических систем. Для описания квазилинейных систем применяются асимптотические методы, позволяющие учитывать нелинейные зависимости в математи-

ческой модели. В таких моделях нелинейные слагаемые принимаются как малые величины относительно линейных составляющих. Асимптотические методы в динамических системах позволили выделить устойчивые и неустойчивые режимы, субгармонические и ультрагармонические колебания, неизохронность собственных колебаний, бифуркации решений, эффекты синхронизации и захватывания. Развитие данных методов продолжилось при исследовании существенно нелинейных динамических моделей, что стало возможным благодаря применению вычислительной техники [82-85].

Динамическая модель считается нелинейной, если хотя бы одна из входящих в ее состав функций является нелинейной [86]. Вид нелинейного уравнения и входящих в его состав функций определяется исходя из задачи. В частности, уравнение вынужденных колебаний математического маятника около нижнего положения равновесия имеет вид:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \sin(x(t)) + D \left(x(t), \frac{dx(t)}{dt} \right) = W(t) \quad (1.1)$$

где $x(t)$ – угол отклонения от положения равновесия,

t – время,

ω_0 – частота малых собственных колебаний,

$W(t)$ – внешнее периодическое воздействие с периодом T ,

$W(t) = W(t + T)$. $D \left(x(t), \frac{dx(t)}{dt} \right) = b \frac{dx(t)}{dt}$ – диссипация энергии, b – ко-

эффициент диссипации.

С учетом того, что функция $x(t)$ является аргументом тригонометрической функции $\sin(x(t))$, уравнение (1.1) относится к существенно нелинейным [78]. Периодические процессы при наличии диссипации имеют затухающий характер и с течением времени их влияние становится незначительным. Существенно нелинейная модель динамической системы не имеет аналитического решения. Достоинством уравнения является то, что оно позволяет анализировать колебания с любыми амплитудами и с высокой точностью. Недостатком является невозможность применения данной модели к описанию систем со сложными исходными данными.

Численные методы решения задачи Коши позволяют получить периодическое решение существенно нелинейной системы [78, 79, 87, 88]: задаются начальные условия, определяется отрезок времени в соответствии с периодом внешнего воздействия. Переходной процесс из-за диссипации не влияет на решение, которые получается в результате численного интегрирования. Для колебаний с небольшой амплитудой модель может быть упрощена за счет ограничения двумя первыми слагаемыми при разложении функции в ряд, в результате чего уравнение примет квазилинейный вид и может быть исследовано с применением асимптотических методов. Решение уравнения не позволит получить никаких существенно нелинейных эффектов, в частности, описания хаотического поведения системы.

$$\sin(x(t)) = x(t) - \frac{x^3(t)}{3!} + \frac{x^5(t)}{5!} - \frac{x^7(t)}{7!} + \dots$$

$$\sin(x(t)) = x(t) - \frac{x^3(t)}{3!} \quad (1.2)$$

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \left(x(t) - \frac{1}{6}x^3(t) \right) + b \frac{dx(t)}{dt} = W \sin \omega t$$

Дальнейшее упрощение модели позволит получить линейное уравнение:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega_0^2 x(t) + b \frac{dx(t)}{dt} = W \sin \omega t$$

Полученное уравнение используется при исследовании резонанса и описания амплитудно-частотных характеристик [89].

Из приведенных выше уравнений видно, что существенно нелинейная модель самая сложная и включает в себя линейную и квазилинейную модели [69, 78, 90]. Эти виды моделей используются для описания различных физических, а также для любых циклических процессов. Отсутствие аналитического решения не позволяет описывать и исследовать хаотические состояния систем.

По процессам динамические модели делятся на переходные, циклические и колебательные. Переходные процессы соответствуют переходу системы от одного состояния к другому за некоторый отрезок времени. В частности, для простейших систем переходным процессом является изменение состояния от статического к динамическому и наоборот. Для простых систем

естественными являются динамические и статические состояния, а для сложных – только динамические [91, 92].

По стохастичности нелинейные системы делятся на детерминированные и стохастические. В детерминированных системах каждое следующее состояние системы определяется однозначно предыдущим состоянием и правилами эволюции системы, то есть, если начальное состояние системы известно, то будущее состояние также будет точно определено. В детерминированных системах нелинейности могут приводить к разнообразным динамическим явлениям, таким как хаос, колебания или сложное поведение [93]. В отличие от детерминированных, стохастические системы подвержены случайным воздействиям или шумам. Это означает, что будущее состояние системы прогнозируется по ее текущему состоянию не точно, а только с некоторой вероятностью. Нелинейность стохастических систем определяется зависимостями между переменными и случайными воздействиями, что приводит к таким явлениям, как стохастический резонанс или случайные колебания [94].

Оба типа систем имеют свои особенности и требуют специальных методов анализа и управления. Детерминированные нелинейные системы, как правило, часто изучаются с помощью теории динамических систем и хаоса, в то время как стохастические нелинейные системы требуют использования стохастических методов и теории вероятностей для их моделирования и анализа.

С учетом вышеизложенного, информационно-измерительные и управляющие системы в микро- и нанoeлектронике следует отнести к классу детерминированных нелинейных динамических систем по следующим причинам:

- высокая степень детерминированности процессов в микро- и нанoeлектронике. Поведение электронных компонентов и систем описывается детерминированными уравнениями, которые точно определяют будущее состояние системы на основе ее текущего состояния.

- присутствие нелинейных эффектов, таких как насыщение транзисторов, нелинейная зависимость тока от напряжения и другие. Указанные нелинейности приводят к сложным динамическим явлениям: колебаниям, хаосу

или нелинейным резонансам.

- управление и измерения в микро- и наноэлектронике требуют точности и быстрой реакции на изменения в системе. Детерминированные системы позволяют более точно прогнозировать динамику поведения производственного процесса и, следовательно, принимать эффективные управленческие решения.

- микро- и наноэлектроника характеризуется высокой степенью сложности взаимодействия компонентов и процессов. Детерминированный подход позволяет более эффективно моделировать и управлять сложными системами.

Несмотря на то, что информационно-измерительные и управляющие системы для микро- и наноэлектронике следует относить к классу детерминированных нелинейных систем, следует отметить, что в реальных условиях могут возникать случайные возмущения или шумы, которые могут усложнять моделирование и управление процессами. Однако, данный факт оказывает несущественное влияние на методы и модели обработки информации с целью оценки состояния и прогнозирования поведения ИИУС производственными процессами, что подтверждается в работах [95-99].

1.3 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Математическим представлением переходного процесса является задача Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений: система n нелинейных дифференциальных уравнений [88, 100]. В момент времени t_0 задаются начальные условия. Поскольку правые части системы уравнений для неавтономных систем зависят от времени, а для автономных – не зависят, время t выделено в квадратные скобки. Дифференциальные уравнения высших порядков сводятся к представленной системе:

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = f_k([t], x_1, \dots, x_n), \quad x_k(t_0) = \xi_k, \quad k = 1, \dots, n \quad (1.3)$$

Для решения системы (1.3) используются численные методы решения

задачи Коши: методы Эйлера, Рунге-Кутта различных порядков, Булиша-Штера. Для некоторых линейных систем можно найти аналитическое решение [101-104].

Существуют задачи с начальными условиями на заданном временном интервале наблюдения [40, 78, 105]. Число условий равно порядку системы дифференциальных уравнений. Одним из методов, применяемых для решения системы, является метод пристрелки.

Циклические модели нелинейных процессов имеют периодические решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Сложные динамические системы не имеют строгой цикличности. Циклическая модель представляет собой систему:

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = f_k([t], x_1, \dots, x_n), \quad k = 1, \dots, n \quad (1.4)$$

Решением является периодическая функция, период цикличности может быть задан или дополнительно определен. Для некоторых нелинейных систем существует несколько устойчивых периодических решений и решений бифуркации. При полностью детерминированных параметрах системы возможно частичное описание хаотического поведения. Для линейных уравнений существуют аналитические периодические решения.

Для точных наук характерны периодические, колебательные процессы в строгом математическом понимании термина периодичность [102, 106, 107]. Для периодических математических процессов найдены решения, которые могут быть использованы для описания циклических процессов. Это хаотическое поведение решений в детерминированных системах, бифуркации решений, сложные полигармонические решения нелинейных моделей и др.

Вынужденные колебания вызваны внешним воздействием, имеющим периодический характер. Для описания вынужденных колебаний используется модель математического маятника [108]. Автоколебания – это устойчивые колебания, источник существования которых не имеет циклического ха-

рактера. Автоколебания характерны для диссипативных систем и описываются уравнением:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx + \gamma x^3 = 0 \quad (1.5)$$

При $b < 0$ – автоколебания с возрастающей амплитудой, $b > 0$ – затухающие колебания с диссипацией энергии. При $b = 0$ система является консервативной, энергия сохраняется, колебания происходят с постоянной амплитудой, определенной начальными условиями.

Параметрические колебания вызываются и поддерживаются периодическими изменениями параметра системы [69, 78, 102, 109]. Для описания параметрических колебаний используется модель математического маятника, точка подвеса которого совершает колебания в направлении силы тяжести g по закону $\xi(t)$.

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \left(1 + \frac{1}{g} \frac{d^2\xi(t)}{dt^2} \right) \sin(x(t)) = 0 \quad (1.6)$$

Гармонические колебания – это колебания, при которых изменяющаяся величина или ее производная во времени изменяются пропорционально синусу с аргументом, линейно зависящим от времени [89]. Полигармонические колебания – это колебания, при которых изменяющаяся величина содержит несколько различных гармоник (слагаемых ряда Фурье). Для представления периодических колебаний в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными $\omega = \frac{2\pi}{T}$, используется ряд Фурье, в котором $x(t)$ с периодом T , удовлетворяет условию Дирихле (ограниченность, конечное число экстремумов и точек разрыва первого рода на любом конечном интервале).

$$x(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega t) + \sum_{k=0}^{\infty} b_k \sin(k\omega t), \quad (1.7)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ - коэффициенты Фурье, $\frac{1}{2} a_0$ – среднее значение периодически меняющейся величины, движение с частотой ω характеризуется коэффициентами a_1, b_1 .

Эта составляющая является основной гармоникой периодического движения [92]. При $k > 1$ коэффициенты характеризуют движение с частотами

$k\omega$. Эти компоненты называются высшими гармониками, а число k – номером гармоники. Используемый для представления периодического процесса ряд Фурье может быть как конечным, так и бесконечным.

Для определения спектра частот и коэффициентов ряда Фурье для периодической функции $x(t)$ с периодом T используется спектральный анализ периодического процесса. Коэффициенты определяются по формулам:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(k\omega t) dt, (k = 0, 1, \dots); \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(k\omega t) dt, (k = 0, 1, \dots) \end{aligned} \quad (1.8)$$

Амплитуда отдельных гармоник вычисляется по формуле:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (1.9)$$

Начальная фаза отдельных гармоник вычисляется по формуле:

$$\operatorname{tg}(\varphi_k) = \frac{b_k}{a_k} \quad (1.10)$$

Для проведения численного спектрального анализа используется специализированное программное обеспечение [87, 91, 92, 110]. Спектральный анализ позволяет достаточно точно описать динамические состояния нелинейной системы, но не позволяет описать хаотическое поведение, а только спрогнозировать его.

Исходя из вышесказанного, существующие решения для математических моделей нелинейных систем, в том числе метод малого параметра; метод осреднения; построение периодических решений; синхронизация в нелинейных динамических моделях позволяют получить решение не в общем виде, а только для частного случая нелинейной системы, а также не позволяют получить описание хаотического компонента нелинейной системы. Как правило, существующие решения имеют высокую погрешность при моделировании нелинейных систем, даже для частных случаев, что делает задачу разработки новых подходов и методов к моделированию нелинейных систем с учетом хаотического состояния особенно актуальной.

1.4 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Статическая устойчивость – это способность нелинейной системы возвращаться к установившемуся состоянию после малых возмущений или внешних воздействий, при которых изменения параметров малы по сравнению с их средними значениями [79, 89, 90, 111].

Динамическая устойчивость – это способность нелинейной системы возвращаться к установившемуся состоянию после значительных возмущений или внешних воздействий [79, 89, 90, 111].

Пусть система состоит из установки с изображенным на рис.1.3 профилем и шарика массы m . Система расположена в поле силы тяжести с ускорением свободного падения g . На профиле есть точки минимума (точки 2, 5), участок горизонтальной поверхности и точка максимума (точка 4). Шарик попеременно помещается в эти точки [112].

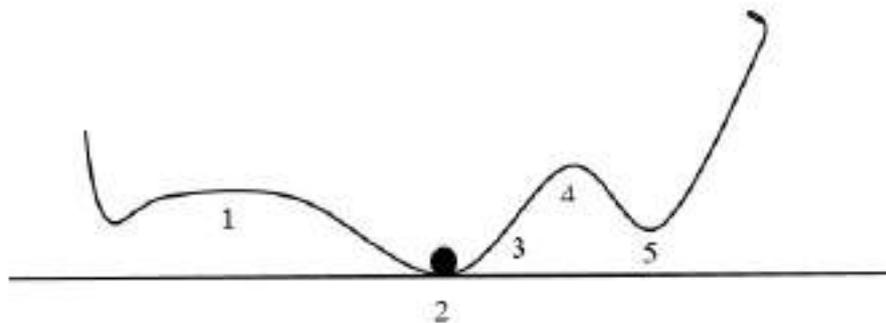


Рис.1.3. Статическое и динамическое равновесие

Устойчивыми положениями системы являются точки локальных минимумов потенциальной энергии 2 и 5. Точка локального максимума потенциальной энергии 4 является неустойчивой. Точка 3 не является точкой равновесия. Точка 1 является точкой безграничного равновесия, поскольку потенци-

альная энергия системы в ее окрестности постоянна [113]. Данная система является консервативной, поскольку в ней сохраняется общая энергия. По теореме об устойчивости состояния равновесия для консервативных систем необходимо и достаточно, чтобы потенциальная энергия системы в этом положении принимала минимальное значение. При отклонении шарика на высоту h от точки 5 совершаются колебания с постоянной амплитудой. Данный динамический процесс является устойчивым поскольку общая энергия системы постоянна [113, 114]. Для описания процесса колебания шарика используются рассмотренные выше нелинейные уравнения. Данная интерпретация нелинейной динамической системы может быть применена для различных областей науки и техники.

При исследовании поведения фазовых траекторий движения консервативной динамической системы в особых точках можно выделить четыре уровня энергии Π [112, 115]. Кривые фазовых траекторий гладкие и дифференцируемые (рис.1.4).

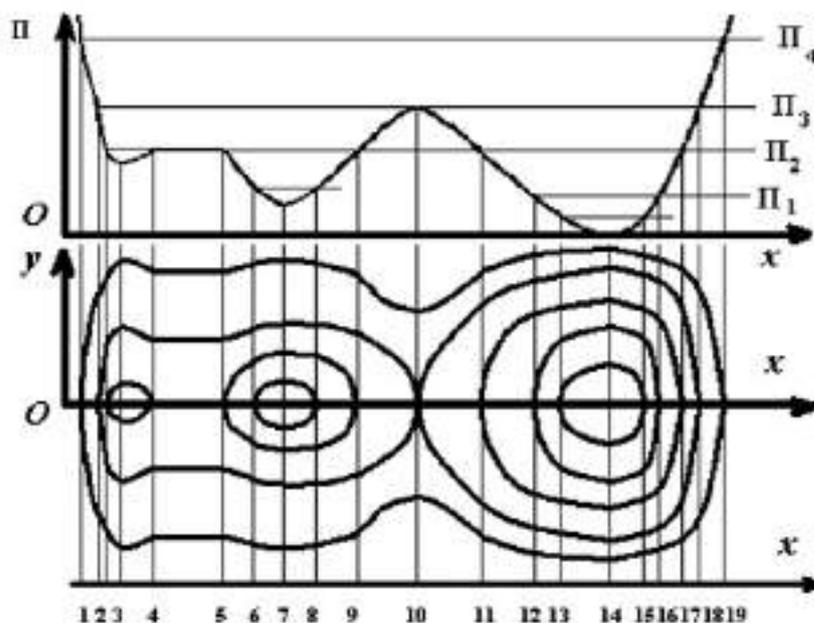


Рис.1.4. Фазовые траектории движения консервативной динамической системы

По виду функции $P(x)$ можно судить об изменении динамики системы. Особые точки 3, 7 и 14 являются точками типа центр [114]. Фазовые траектории вблизи них представляют собой замкнутые кривые, соответствующие предельным циклам и собственным колебаниям динамической системы с амплитудой меньшей, чем порог потенциального барьера рассматриваемой точки. Особая точка 10 соответствующая неустойчивому положению нелинейной системы представляет собой точку типа седло. Сепаратриса, проходящая через точку 10, соответствует уровню потенциальной энергии P_3 . Сепаратриса, проходящая через точки 2, 4, 5, 9, отделяет два центра динамической системы. Фазовая траектория, проходящая через точки 1 и 19, соответствует колебаниям с большим уровнем энергии P_4 . Кривые вблизи центров 3, 7 и 14 соответствуют колебаниям с малым уровнем энергии P_1 .

Приведенная выше интерпретация нелинейной динамической системы и исследование фазовых траекторий используются для исследования устойчивости более сложных систем с другими видами особых точек.

Устойчивость движения нелинейных систем

В процессе существования динамической системы в течение времени ее параметры могут изменяться. Система считается структурно устойчивой или грубой, если ее состояние мало изменяется при малом изменении параметров и эти изменения носят количественный, а не качественный характер. Напротив, если малое изменение параметра приводит к качественному изменению состояния системы, то такая система называется структурно неустойчивой или негрубой. Определить качественность изменений состояния нелинейной системы позволяет исследование фазового портрета. При некачественных изменениях фазовый портрет останется практически тем же. Появление новых положений равновесия, предельных циклов, типов устойчивости решений свидетельствует о качественных изменениях состояния динамической системы [89, 90, 116, 117]. При количественных изменениях движения грубой нелинейной системы качественных изменений не происходит. При изменении пара-

метров нелинейной системы динамика количественных состояний определяется чувствительностью системы. Для негрубых систем функция чувствительности при определенных условиях стремится к бесконечности. Для исследования структурной устойчивости нелинейной системы рассмотрим систему с профилем $\Pi(x)$, представленным на рис.1.5.

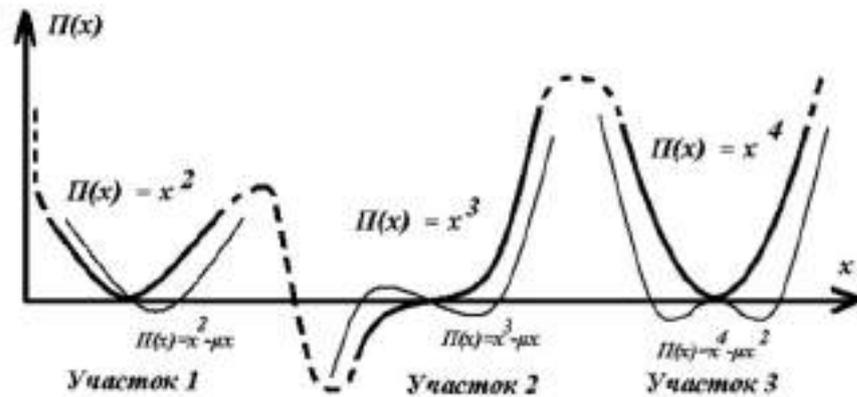


Рис.1.5. Профиль нелинейной системы

Профиль $\Pi(x)$ содержит три участка с зависимостями $\Pi(x) = x^2$, $\Pi(x) = x^3$ и $\Pi(x) = x^4$. Критической точкой для каждого из участков является точка $x = 0$, поскольку производная $\frac{d\Pi(x)}{dx} = 0$. Первый и третий участки имеют минимум, а второй – точку перегиба в точке $x = 0$.

Для исследования устойчивости нелинейной системы введем малое изменение параметров $0 < \mu \ll 1$. Соответственно для участков $\Pi(x) = x^2 - \mu x$, $\Pi(x) = x^3 - \mu x$, $\Pi(x) = x^4 - \mu x^2$.

Анализируя результат, получим, что на первом участке качественных изменений не произошло [112, 115]. На участке 2 появились две особые точки – седловая неустойчивая ($\Pi(x) = \max$) и центральная устойчивая ($\Pi(x) = \min$). На участке 3 вместо особой устойчивой точки типа центр появилась неустойчивая точка типа седло и две устойчивые особые точки типа центр. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на участке 1 система структурно устойчива, а на других участках – структурно неустойчива.

Применяю описанную интерпретацию к нелинейным системам различного происхождения можно получать параметры возникновения устойчивых и неустойчивых состояний, но не их описание.

Устойчивость решений моделей динамических систем

Исследовать устойчивость решений динамической системы будем на модели, состоящей из системы n нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = X_i(t, x_1, \dots, x_n), i = 1, \dots, n \quad (1.11)$$

Движение системы является невозмущенным, если при $t = t_0$ $x_i(t_0) = x_{i0}$. Невозмущенному движению системы соответствует частное решение системы (1.11).

$$x_i(t) = \varphi_i(t), \varphi_i(t_0) = x_{i0} = \varphi_{i0} \quad (1.12)$$

При отклонении начальных условий от исходных значений движение нелинейной системы считается возмущенным и соответствует $\delta\varphi_i(t) = x_i(t) - \varphi_i(t)$.

$$\frac{d\delta\varphi_i(t)}{dt} = X_i(t, x_1 + \varphi_1, \dots, x_n + \varphi_n) - X_i(t, x_1, \dots, x_n), i = 1, \dots, n \quad (1.13)$$

Система уравнений (1.13) позволяет описывать состояния нелинейной системы при возмущенном движении. Функция $\delta\varphi_i(t) = x_i(t) - \varphi_i(t)$ описывает возмущения [90, 115].

Согласно критерию Ляпунова, невозмущенное движение называется устойчивым, если для любого сколь угодно малого положительного числа ε можно найти такое число $\delta(\varepsilon)$, что для всех возмущенных движений, удовлетворяющих условию $\sum_{i=1}^n \delta\varphi_{i0}^2 \leq \delta(\varepsilon)$ при всех $t \geq t_0$, будет выполняться условие $\sum_{i=1}^n \delta\varphi_i^2 \leq \varepsilon$. Если выполняется условие $\sum_{i=1}^n \delta\varphi_i^2 \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, то невозмущенное движение является асимптотически устойчивым.

В настоящее время для представления состояния нелинейной системы и описания ее поведения используются гармонический анализ, метод фазовой плоскости, метод сингулярных возмущений, метод адаптивного управления и

метод локализации.

Гармонический анализ — это метод анализа сигналов и систем, основанный на представлении любой периодической функции в виде суммы гармонических функций различных частот [116, 117]. Основные положения гармонического анализа включают:

- разложение в ряд Фурье, т.е. представление любой периодической функции в виде бесконечной суммы гармоник различных частот с различными амплитудами и фазами;
- использование частотного спектра для анализа и обработки сигналов;
- применение фильтров при обработке сигналов, позволяющих выделять интересующие частоты и подавлять нежелательные компоненты.

Преимущества гармонического анализа для представления состояния нелинейной детерминированной системы заключается в возможности исследования поведения системы в частотной области, что особенно важно при наличии периодических и квазипериодических сигналов. Выделение отдельных гармоник с различными частотами позволяет изучать резонансы и другие нелинейные эффекты в нелинейной детерминированной системе.

Однако, гармонический анализ предполагает линейность системы, что недостаточно для описания сложных нелинейных эффектов, таких как искажения гармоник, генерация новых частот и другие. Исследование нелинейных эффектов возможно только для отдельных выделенных гармоник. Кроме того, гармонический анализ хорошо работает для периодических сигналов, но может столкнуться с трудностями при анализе квазипериодических или случайных сигналов. Указанные недостатки не позволяют эффективно и полноценно использовать гармонический анализ для представления состояния и исследования динамики поведения нелинейной детерминированной системы, к которой относится ИИУС производственных процессов в микро- и наноэлектронике.

Метод фазовой плоскости является мощным инструментом для анализа динамики системы [118, 119]. Основные положения метода фазовой плоскости

включают:

- использование понятия фазового пространства, в котором каждое состояние системы описывается набором координат, называемых фазовыми переменными.

- построение траекторий и фазовых кривых в фазовом пространстве для представления динамики системы, отражающих изменение состояния системы со временем.

- анализ стабильности системы и ее точек равновесия на основе траекторий и кривых в фазовой плоскости с целью выявления устойчивых и неустойчивых режимов нелинейной системы.

Следовательно, использование метода фазовой плоскости для описания состояния нелинейной детерминированной системы позволяет получить геометрическое представление динамики системы, что упрощает визуализацию и понимание ее поведения. Кроме того, геометрическое представление динамики системы позволяет определить устойчивость системы, наличие циклов, аттракторов и других динамических свойств.

Недостатком метода фазовой плоскости для представления состояния нелинейных детерминированных систем является увеличение сложности интерпретации результатов с увеличением количества переменных системы и связей между ними.

Метод сингулярных возмущений является математическим методом, используемым для анализа систем с малым параметром, который влияет на динамику системы [120-122]. Основные положения метода сингулярных возмущений включают:

- использование иерархии временных масштабов, подразумевающих разделение системы на две или более подсистемы с различными временными масштабами. При этом одна подсистема изменяется быстро, а другая медленно.

- построение асимптотических разложений по малому параметру, что позволяет разделить задачу на анализ быстрой и медленной динамики.

- учет сингулярных возмущений, приводящих к изменениям в динамике системы, особенно при стремлении параметра к нулю.

Преимущество метода сингулярных возмущений для представления состояния нелинейной детерминированной системы заключается в учете многоскоростной динамики в различных временных масштабах. Кроме того, метод сингулярных возмущений позволяет получить аналитические выражения для решения системы, что упрощает анализ и понимание динамики ее поведения.

При этом метод сингулярных возмущений имеет ограничения на применимость в случаях, когда сингулярные возмущения слишком сложны или неявны. Построение асимптотических разложений требует определенного опыта и знаний, и неправильное разложение может привести к неточным результатам. Кроме того, для некоторых систем метод может обеспечить только приближенное решение, что может быть недостаточно точным для определенных приложений.

Метод адаптивного управления - это метод управления динамической системой, позволяющий автоматически адаптироваться к изменениям внешних условий или параметров системы [123]. Основные положения метода адаптивного управления включают:

- идентификацию параметров системы и их изменений в реальном времени;
- адаптацию управляющего сигнала в соответствии с идентифицированными параметрами системы для обеспечения желаемого поведения;
- использование обратной связи и коррекции ошибок между желаемым и фактическим поведением управляемой системы.

Преимущество метода адаптивного управления для представления состояния нелинейной детерминированной системы состоит в эффективности использования для сложных и изменчивых систем за счет учета внешних условий и параметров системы и возможности обучаться на основе опыта. Кроме того, метод адаптивного управления позволяет работать в режиме реального

времени.

К недостаткам метода адаптивного управления для представления состояния нелинейной детерминированной системы сложность настройки параметров для обеспечения стабильной работы системы. Кроме того, метод имеет высокую чувствительность к шумам и возмущениям, что приводит к нестабильной работе системы. Реализация метода требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при работе в реальном времени.

Метод локализации в контексте представления состояния нелинейной детерминированной системы относится к процессу определения положения объекта или системы в пространстве или времени [124, 125]. Основные положения метода локализации включают:

- использование датчиков различных типов датчиков, таких как GPS, акселерометры, гироскопы, для определения положения системы;
- обработку полученных от датчиков данных с целью определения точного положения системы в пространстве или времени;
- использование специальных алгоритмов для определения положения системы на основе данных от датчиков.

При правильной настройке и использовании метод локализации может обеспечить высокую точность определения положения системы с возможностью отслеживания ее движения в режиме реального времени, что является преимуществом метода локализации для представления состояния нелинейной детерминированной системы.

Однако, зависимость метода локализации от точности датчиков и неправильной обработки полученных данных приводит к ошибкам в определении положения системы. Кроме того, имеются ограничения на применимость метода для различных условий окружающей среды. Для корректной работы метода локализации требуется сложная и правильная калибровка датчиков и алгоритмов.

С учетом вышеизложенного сделан вывод о том, что существующие спо-

собы представления состояния нелинейных систем позволяют определять особые точки и их тип в моделях нелинейных систем, получать параметры возникновения устойчивых и неустойчивых состояний, но не их описание. Стандартные методы: гармонический анализ, метод фазовой плоскости, метод сингулярных возмущений, метод адаптивного управления, метод локализации, - в данном случае неэффективны, так как не учитывают нелинейность системы.

1.5 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ

В настоящее время к наиболее популярным средствам обработки информации в ИИУС производственными процессами с учетом их нелинейности относится пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB [126, 127], система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования Mathcad [128, 129], российская среда моделирования SimInTech [130-132], программное обеспечение для имитационного моделирования AnyLogic [133].

MATLAB (от англ. Matrix Laboratory) - это пакет прикладных программ для решения технических задач, численных вычислений, анализа данных, визуализации и моделирования систем, разработанный компанией MathWorks. MATLAB имеет множество инструментов и функций для работы с матрицами, графиками, статистикой, оптимизацией и многими другими областями.

MATLAB имеет простой и интуитивно понятный синтаксис, что делает его доступным для начинающих пользователей. При этом обладает широким спектром функций и инструментов для решения различных задач, включая численные вычисления, обработку сигналов, оптимизацию, моделирование и другие. Для использования дополнительных методов и средств обработки данных возможна интеграция с языками программирования C++, Java и Python.

Применение MATLAB в информационно-измерительных и управляющих системах с учетом их нелинейности делает доступным мощные инструменты для обработки и анализа данных, что позволяет эффективно работать с информацией, полученной из измерительных систем. Кроме того, MATLAB позволяет создавать математические модели нелинейных систем и проводить их анализ при проектировании управляющих систем для работы с нелинейными объектами. Для настройки параметров управляющих систем MATLAB предоставляет возможности для решения задач оптимизации.

Таким образом, с учетом особенностей MATLAB к преимуществам его использования для обработки информации в информационно-измерительных и управляющих системах с учетом их нелинейности следует отнести: широкий выбор функций для работы с данными, моделирования и оптимизации; быстрое выполнение вычислений; визуализацию данных.

Недостатками использования MATLAB в информационно-измерительных и управляющих системах являются:

- высокая стоимость лицензии, что может являться критическим фактором для небольших производственных предприятий;
- ограниченная поддержка распараллеливания вычислений, что замедляет выполнение больших задач.

Несмотря на указанные недостатки, MATLAB является мощным инструментом для обработки информации в информационно-измерительных и управляющих системах с учетом их нелинейности благодаря своим возможностям моделирования, анализа данных и оптимизации.

Mathcad — это коммерческое программное обеспечение для инженерных расчетов и документации, разработанное компанией PTC (Parametric Technology Corporation). Mathcad позволяет инженерам и научным работникам выполнять математические вычисления, создавать технические документы и отчеты с использованием математических формул, графиков и таблиц.

Mathcad предоставляет интерактивную среду для создания и редактиро-

вания технических расчетов и документов, используя математические выражения и символьные вычисления. Программа позволяет строить графики, таблицы и другие визуальные элементы для наглядного представления результатов расчетов. Возможна интеграция с другими инженерными программами и системами, что облегчает обмен данными и результатами расчетов.

Применение Mathcad в информационно-измерительных и управляющих системах с учетом их нелинейности позволяет проводить сложные математические расчеты, включая символьные вычисления, моделировать и проектировать производственные процессы.

Основными недостатками Mathcad в информационно-измерительных и управляющих системах являются ограниченные возможности расширения функциональности по сравнению с другими программами и высокая стоимость лицензии.

Однако, Mathcad является полезным инструментом для проведения математических расчетов, создания технической документации в информационно-измерительных и управляющих системах с учетом их нелинейности благодаря своей удобной интерактивной среде и возможностям визуализации данных.

SimInTech - это программный продукт, разработанный компанией «ООО «СимСистемс» для моделирования и анализа динамических систем, включая информационно-измерительные и управляющие системы с учетом их нелинейности.

SimInTech представляет собой инструмент для моделирования динамических систем с использованием блок-схем, математических моделей и средств визуализации. Программа применяется для моделирования и анализа информационно-измерительных и управляющих систем с учетом их нелинейности, позволяет проводить численное интегрирование, анализировать динамику систем и оптимизировать параметры управления.

Преимущества использования SimInTech для обработки информации за-

ключаются в обеспечении возможности SimInTech создания и анализа математических моделей нелинейных систем; интеграции с измерительными устройствами для анализа реальных данных и проверки моделей; визуализация результатов моделирования.

Следует отметить сложность работы с программой и ее высокую стоимость. Однако, использование SimInTech для обработки данных в информационно-измерительных и управляющих системах проводить анализ динамики систем, оптимизировать параметры управления и изучать поведение нелинейных систем.

AnyLogic - это мощная мультиагентная платформа для моделирования и анализа сложных систем, разработанная компанией The AnyLogic Company.

AnyLogic представляет собой инструмент, объединяющий в себе возможности дискретного, непрерывного и агентного моделирования. Это позволяет создавать комплексные модели, учитывающие различные аспекты системы. Платформа AnyLogic применяется для моделирования и анализа различных видов систем, включая производственные процессы, логистику, транспорт, здравоохранение, финансы и другие области. Она используется для оптимизации бизнес-процессов, принятия решений и анализа поведения систем.

Основным преимуществом платформы AnyLogic является мультиагентное моделирование, учитывающее поведение индивидуальных элементов системы. Как и другие рассмотренные средства обработки информации в информационно-измерительных и управляющих системах AnyLogic позволяет визуализировать полученные результаты.

Таким образом, AnyLogic представляет собой гибкую и мощную платформу для моделирования сложных систем, включая информационно-измерительные и управляющие системы с учетом их нелинейности, позволяет создавать комплексные модели, проводить анализ поведения системы в различных условиях и оптимизировать процессы. Однако, стоит учитывать сложность использования и стоимость при выборе этого инструмента для обработки информации в нелинейных системах.

С учетом вышеизложенного следует вывод, что в основе вычислительного аппарата перечисленных средств лежат существующие методы и математические модели, которые также не учитывают нелинейные факторы внутреннего контура современных ИИУС производственных процессов для микро- и наноэлектроники и внешних воздействий на них.

1.6 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Первоначально понимание сложных систем, таких, как производственный процесс, связано с представлением о том, что их невозможно описать при помощи математических моделей. Сегодня, однако, происходит все более активное проникновение физических методов и комплексных подходов к представлению производства, учету множества факторов и объединения их в экосистему [134]. Более того, основные формы кооперативного поведения, регулирования производственных факторов имеют свои аналоги среди механических систем. Состояние любого производственного процесса определяется состоянием соответствующей ему информационно-измерительной и управляющей системы. При этом информационно-измерительная и управляющая система производственного процесса представляет собой иерархию достаточно автономных подсистем, в которой исходящие от верхнего уровня сигналы управления не имеют характера жестких команд, подчиняющих себе активность всех индивидуальных элементов более низких уровней. Вместо этого от высших уровней иерархии поступают сигналы, которые предопределяют переходы подсистем от одного режима функционирования к другому.

Моделирование нелинейных систем различной сложности, в том числе и со способностью к самоорганизации, является междисциплинарным инструментом исследования разнообразных процессов в природе, технике, обществе [135-138]. При этом важно разработать единые теоретические основы моделей состояния, прогнозирования поведения управляемого процесса, новых мето-

дов принятия решения для построения эффективных ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, сочетающие преимущества различных подходов, в том числе нелинейной динамики, повышающих устойчивость и управляемость ИИУС.

В связи с взрывным развитием информационных технологий во всех областях человеческой деятельности и, соответственно, повышением турбулентности в финансово-экономической сфере, но в то же время износом и моральным старением основных фондов производства, в том числе и в микро- и наноэлектронике, нелинейность всех перечисленных составляющих становится критическим параметром, что влечет за собой техногенные катастрофы.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что отсутствие единых методологических подходов к построению ИИУС различной сложности с учетом нелинейности производственной среды, состояния исполнительных механизмов и оборудования, человеческого фактора, порождает проблемную ситуацию: существующие математические модели и методы обработки измеряемой информации о совокупности параметров производства не позволяют с требуемой точностью оценивать состояние управляемого процесса и, следовательно, принимать эффективные управленческие решения. Причинами проблемной ситуации являются упрощение и потеря полноты представления ИИУС, исключение из рассмотрения взаимозависимости параметров как в общих, так и частных случаях, а также линеаризация нелинейных составляющих внешнего воздействия и внутреннего контура систем.

ИИУС можно рассматривать как детерминированную нелинейную динамическую систему, для исследования поведения которой, применим метод, основанный на использовании формального аппарата теории устойчивости, теории хаоса. Стандартные методы: гармонический анализ, метод фазовой плоскости, метод сингулярных возмущений, метод адаптивного управления, метод локализации, - в данном случае неэффективны, так как не учитывают нелинейность системы.

В свою очередь, ни одна из моделей согласно существующей классификации, - модели нелинейные с постоянными и переменными коэффициентами, существенно нелинейные, распределенные, и нелинейные с запаздыванием, - также неприменима для разработки современной ИИУС в силу следующих недостатков:

1) В существенно нелинейной модели используется задача Коши, требующая для решения начальные условия, определяемые на основе сочетания компонентных и топологических уравнений отдельных элементов процесса, вид которых задается связями между элементами, что является затруднительным, особенно, для сложных процессов.

2) Отсутствие аналитического решения в большинстве моделей не позволяет моделировать и исследовать хаотические состояния ИИУС.

3) Зависимости и коэффициенты в уравнениях определяются постановкой задачи и заданным уровнем точности модели, и, кроме того, вычисляются эмпирически, что является нетривиальной задачей и требует дополнительных исследований. Получить точную модель ИИУС возможно для частных случаев.

4) Для решения уравнений используется конструктивный подход с элементами численных методов, сплайны, аппроксимация, что приводит к увеличению погрешности модели ИИУС и, в некоторых случаях, невозможности решения системы дифференциальных уравнений для процессов с хаотическим поведением.

5) Определение особых точек и их типа в моделях НС позволяет получить не описание устойчивых и неустойчивых состояний ИИУС, а параметры их возникновения.

6) При изменении параметров ИИУС или внешних воздействий получаются различные по виду нелинейных эффектов модели, что требует дополнительных исследований для определения вида функциональной зависимости и коэффициентов.

Таким образом, для достижения цели исследований необходима разработка лишенной перечисленных недостатков модели ИИУС с помощью адекватных средств.

В настоящее время к наиболее популярным средствам обработки информации в ИИУС относится пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB, система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования Mathcad, российская среда моделирования SimInTech, программное обеспечение для имитационного моделирования AnyLogic. Однако, в основе вычислительного аппарата перечисленных средств лежат существующие методы и математические модели, которые также не учитывают нелинейные факторы внутреннего контура современных ИИУС и внешних воздействий на них.

В результате, на основании вышесказанного, сделан вывод о необходимости развития теории построения современных ИИУС на основе создания моделей, алгоритмов и методологии повышения управляемости систем, базирующихся на применении нелинейной динамики.

Следовательно, задача повышения управляемости информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники на основе применения формального аппарата нелинейной динамики является своевременной и актуальной и является целью диссертационной работы.

К достижению указанной цели приведет решение следующих задач.

1. Аналитический обзор существующих методов, моделей и средств обработки информации в современных ИИУС.
2. Разработка теоретических подходов к техническим решениям построения ИИУС.
3. Разработка обобщенной математической модели ИИУС на основе формального аппарата теории хаоса в приложении к состоянию процесса управления в терминах объектно-ориентированной парадигмы.
4. Разработка алгоритма управления устойчивостью ИИУС на основе

анализа характеристик системы для инициации детерминированного хаоса с целью достижения состояния устойчивого.

5. Разработка математического описания граничных состояний ИИУС, условий их наступления и динамики изменения состояния системы при внешнем управляющем воздействии.

6. Разработка алгоритма анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС, обеспечивающего условия формирования и корректировки управляющего воздействия.

7. Разработка алгоритма принятия решения при условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей ИИУС.

8. Разработка методики построения ИИУС на основе разработанных моделей и алгоритмов.

9. Разработка технического решения на основе предложенных моделей, алгоритмов и методики в виде смарт-компонента, входящего в состав ИИУС.

10. Экспериментальные исследования, верификация и оценка эффективности полученных результатов.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Приведены характеристические особенности и проблемы производственных процессов в микро- и наноэлектронике с учетом нелинейности. Определены ключевые проблемы отрасли, их причины и возможные пути решения.

2. Проведено исследование существующих моделей нелинейных систем. Обоснованы сложности их применения для моделирования ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

3. Сформулированы результаты аналитического обзора современных математических методов для решения различных моделей нелинейных систем. Указаны трудности их использования для решения математических моделей ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

4. Проведен аналитический обзор существующих способов представления состояния нелинейных систем. Сделан вывод об их ограничениях для представления состояния ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

5. Рассмотрены существующие средства обработки информации в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники с учетом нелинейности. Приведены ограничения при их использовании в ИИУС.

5. Сформулирована цель и задачи диссертационной работы; обоснована необходимость развития теории построения современных ИИУС на основе создания моделей, алгоритмов и методологии повышения управляемости системы, базирующейся на применении нелинейной динамики.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ИЕРАРХИЧНОСТИ КОМПОНЕНТОВ

2.1 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ С ЗАДАНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

На основе изложенного в главе 1 показано, что информационно-измерительная система производственного процесса для микро- и наноэлектроники является детерминированной нелинейной динамической системой [51, 78]. Нелинейная система – это открытая система, которая непрерывно взаимодействует со своей средой. Взаимодействие может принимать форму информации, энергии или материальных преобразований на границе с системой. При этом нелинейные системы обладают свойством самоорганизации и динамического хаоса. Согласно определению Г. Хакена, самоорганизация – процесс упорядочения (пространственного, временного или пространственно-временного) в открытой системе, за счет согласованного взаимодействия множества элементов ее составляющих [67, 79, 134]. Самоорганизация и хаотичность значительно затрудняет моделирование поведения нелинейных систем, особенно, информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники. Одним из способов решения данной проблемы является декомпозиция ИИУС. Этот способ основан на утверждении, что любая система представляет собой иерархию автономных подсистем, в которой исходящие от верхнего уровня команды управления определяют переходы подсистем более низких уровней от одного режима функционирования к другому [135].

Существуют два основных подхода к декомпозиции: функциональный и процессный [136-139]. В первом разделение на подсистемы происходит на ос-

нове функций – многократно повторяемых действий. Функциональный подход применяется для моделирования регулярной, многократно повторяющейся деятельности. В процессном подходе декомпозиция строится на процессах – устойчивой деятельности, преобразующей входные воздействия в результат. Для ИИУС из-за их склонности к самоорганизации и хаотичности сложно определить функции, поскольку они не постоянны. В то время как подпроцессы, происходящие в ИИУС, постоянны, имеют результат и критерий завершения. За подпроцессы отвечают один или несколько взаимосвязанных компонентов ИИУС.

В процессе разделения ИИУС на компоненты более высоких уровней получаем ее иерархическую модель, а упрощенное графическое представление такой декомпозированной системы назовем иерархической структурой (ИрхС) [76, 140].

Иерархическая структура представляет собой дерево или граф без замкнутых маршрутов с расположением вершин по определенным уровням (рис.2.1). Вершина верхнего (нулевого) уровня называется корнем и соответствует исходной информационно-измерительной и управляющей системе. Такой подход использован в [141, 142] при математическом описании процесса формирования профилированных интерфейсов пользователей для доступа к объединенным корпоративным информационным ресурсам.

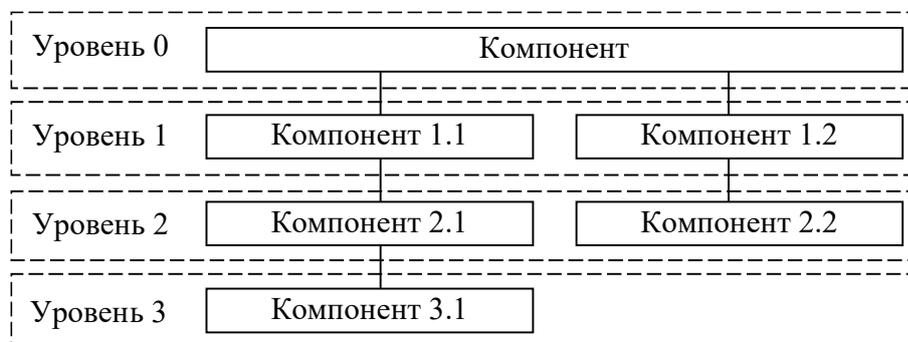


Рис.2.1. Иерархическое представление ИИУС

Для представления иерархической структуры используются деревья разного типа: И-дерево, ИЛИ-дерево, а также И-ИЛИ-дерево. В графе, соответствующему И-дереву, вершины, расположенные на одинаковых уровнях, являются обязательными элементами вышерасположенных подсистем. В ИЛИ-дереве на одинаковых уровнях располагаются вершины возможных элементов подсистем или их варианты. Наиболее часто применяют И-ИЛИ-дерево, в котором уровни с обязательными элементами подсистем соединяются с уровнями вариантов всех или части этих элементов. Сочетание И- и ИЛИ-уровней произвольно.

Количество уровней и вершин иерархической структуры системы произвольно, но не более чем счетно. Для доказательства используем математическую модель организации доступа к объединенным корпоративным информационным ресурсам [141, 143-145], которая математически представляет собой детерминированную нелинейную динамическую систему, поскольку описывается дифференциальными уравнениями и обладает важным свойством нелинейных систем – состоянием, которое зависит от различных внешних факторов (роли пользователя, его разрешений, точки доступа к ресурсам и т.п.). Таким образом, процесс организации доступа является частным случаем рассматриваемой в данной главе сложной детерминированной нелинейной динамической системой со способностью к самоорганизации, в связи с чем возможно использование его математической модели, построенной с применением иерархических принципов и описывающей изменение состояния системы.

Для доказательства конечности иерархической структуры введем ряд определений [146]. Событие – это выполнение условия добавления компонента в иерархическую структуру. Обработчиком события называется блок команд, которые выполняются при наступлении события. Правильным называется такой обработчик события, работа которого заканчивается за конечное число шагов. При дальнейшем описании процесса формирования иерархической структуры рассматриваем только правильные обработчики.

Обработка событий при формировании структуры организуется с помощью очереди Q . $Q = \{q_1, \dots, q_n\}$ - множество вызовов обработчиков событий. Если $i < j$, то событие q_i обрабатывается раньше события q_j . Помещение события в очередь означает то, что в очередь помещается вызов обработчика этого события. Обозначим Q_t состояние очереди после обработки t первых элементов, если $Q_{t-1} \neq \emptyset$. Q_0 - состояние очереди до начала обработки.

События из очереди обрабатываются последовательно и если в процессе исполнения обработчика появляются новые события, то они помещаются в конец очереди. Исполнение одного блока команд приводит к помещению в очередь конечного числа событий. В очередь не попадают одинаковые события, т.е. в одном иерархическом представлении ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники нет одинаковых элементов.

Для построения иерархической структуры определено конечное и счетное число событий, поэтому для обработки конкретной ИИУС существует не более чем конечное и счетное множество E всех событий e .

$$E = \{e_i\}_i^N \quad (2.1)$$

Пусть $Q_0 = \{q\}$, т.е. в очереди только одно событие q по обработке элементов ИИУС, M_1q - события, порождаемые обработкой события q . Это может быть декомпозиция компонента на ряд более мелких элементов. Если $M_1q \neq \emptyset$, то процесс обработки продолжается. M_nq - последовательность событий, порождаемых при обработке последовательности $M_{n-1}q$. Если $M_{n-1}q$ пуста, то и M_nq пуста.

$$M_{n+1}q = Y_{e_k \in M_nq}^{M_kq} M_1e_k, n = 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

k - порядковый номер события в последовательности.

Если в Q_0 больше одного элемента, то

$$M_{n+1}Q_0 = Y_{e_k \in M_nQ_0}^{M_nQ_0} M_1e_k, M_1Q_0 = Y_{e_k \in Q_0}^{Q_0} M_1e_k, n = 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

Обработка событий заканчивается тогда, когда заканчиваются события

в очереди (т.е. заканчиваются компоненты в ИИУС производственным процессом).

$$\exists N: M_N Q_0 = \emptyset \quad (2.4)$$

Докажем, что число шагов обработки очереди конечно.

Условие

$$\forall t \forall e \in Q_t \forall Ne \notin M_N e, \quad (2.5)$$

при выполнении которого в очередь не попадают события, порождающие сами себя, т.е. не происходит закливаний при выполнении программных блоков.

Представим компонент ИИУС производственным процессом в виде дерева (компоненты ИИУС можно представить несколькими типами деревьев). Здесь (рис 2.2) рассматривается самый сложный тип дерева И-ИЛИ: элемент 0 уровня состоит из нескольких вариативных компонентов; причем для краткости представлено только два таких компонента. В реальности ИИУС производственным процессом может содержать несколько вариативных элементов в различных компонентах, но в любом случае их количество не более чем счетное.

Уровень i (L_i) – это все вершины дерева, построенные на i -ом шаге обработки событий формирования иерархической структуры. Вершины дерева соответствуют событиям. Всего таких уровней n , где n – число шагов обработки событий по формированию иерархической структуры ИИУС. Первоначально необходимо выбрать одно событие q , которое станет корнем дерева $L_0 = \{q\}$. Далее для каждой вершины дерева (элемента) $s \in L_{n-1}: M_1 s \neq \emptyset$ добавить элементы последовательности $M_1 s$. При $M_1 s = \emptyset$ дерево построено, т.е. структура сформирована.

Построим теперь элемент иерархической структуры, соответствующий И-ИЛИ дереву, представленному на рис.2.1. Пусть q – событие по обработке разделения ИИУС на основные компоненты, r – событие по добавлению Компонента 1.1, aq – событие по добавлению Компонента 1.2, fq – событие по добавлению Компонента 2.1, ar – событие по обработке Компонента 2.2 и fr – событие по добавлению Компонента 3.1. Тогда получим:

$M_1q = \{r, aq\}$, $M_1r = \{ar\}$, $M_1aq = \{fq\}$, $M_1ar = \{fr\}$, $M_1fq = \emptyset$,
 $M_1fr = \emptyset$. Графическая интерпретация иерархической структуры представ-
 лена на рис.2.2.

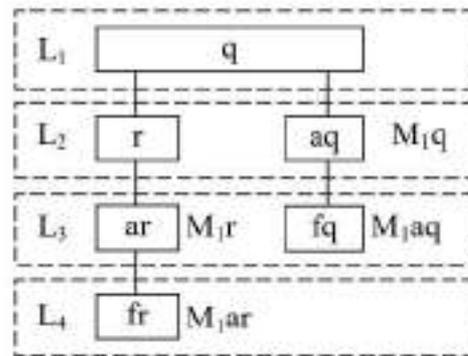


Рис.2.2. Элемент иерархической структуры ИИУС, представленный в виде
 дерева

Учитывая условие $\forall t \forall e \in Q_t \forall Ne \notin M_N e$, и то, что в результате обра-
 ботки одного события в очередь не попадают одинаковые события, в дереве
 не может быть более $|E|$ уровней. Отсюда следует, что для любой вершины k
 уровня существует не более $|E| - k$ подвершин. Соответственно, в каждом
 уровне содержится не более чем

$$p_k = \frac{(E-1)!}{(E-k)!} \quad k = \overline{1, |E|} \quad (2.6)$$

элементов, а все дерево состоит не более чем из

$$V = \sum_{k=1}^E p_k = \sum_{k=1}^E \frac{(E-1)!}{(E-k)!} \quad (2.7)$$

вершин. Построенное таким образом дерево соответствует попаданию собы-
 тий в очередь, очередь обрабатывается не более, чем за V шагов.

Таким образом, конечность и счетность уровней и вершин иерархиче-
 ской структуры ИИУС производственным процессом доказана.

Определим основные принципы декомпозиции ИИУС производствен-
 ными процессами для микро- и нанозлектроники.

1. Каждое разделение ИИУС или компонента образует свой уровень. Ис-

ходная ИИУС располагается на нулевом уровне. После ее разделения получаются компоненты первого уровня. Разделение этих компонентов или некоторых из них приводит к формированию компонентов второго уровня и т.д.

2. Информационно-измерительная и управляющая система производственным процессом разделяется только по одному, постоянному для всех уровней, признаку. Для ИИУС в качестве такого признака целесообразно использовать процесс изменения состояния ИИУС, этап жизненного цикла, производственного процесса и подобное. При построении И-ИЛИ-деревьев в некоторых случаях возможно сочетание нескольких признаков. В частности, при декомпозиции компонента конечного уровня может быть использован функциональный признак.

3. Выделяемые в результате декомпозиции компоненты должны полностью характеризовать исходную информационно-измерительную и управляющую систему производственным процессом. При этом, в ИЛИ-дереве выделяемые компоненты должны полностью взаимно исключать друг друга.

4. Количество выделяемых в процессе декомпозиции ИИУС уровней и вершин иерархической структуры определяется требованиями детализации и удобства восприятия получаемой структуры, ее соответствия условиям задачи, в рамках которой происходит данное разбиение, и уровню знаний работающему с ней специалисту. Разбиение ИИУС производственным процессом на компоненты происходит до такого уровня, на котором понимание устройства компонентов или их описание доступно исполнителю. Таким образом, иерархическая структура всегда субъективно ориентирована: для более квалифицированного специалиста она менее подробна.

Следовательно, декомпозиция информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и нанoeлектроники позволяет более эффективно анализировать и проектировать сложные системы, а также обеспечивает возможность модульного подхода к разработке и улучшению системы.

2.2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ТЕХНИЧЕСКИМ РЕШЕНИЯМ СОЗДАНИЯ ИИУС ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА И ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ

В общей теории систем доказано, что большинство систем декомпозируется на базовые подсистемы, при этом возможно каскадное или последовательное соединение подсистем, параллельное соединение подсистем, соединение с помощью обратной связи или комбинация этих соединений [108, 143, 147].

Процессный подход в теории управления и теории систем заключается в рассмотрении любой системы как набора взаимосвязанных и взаимодействующих процессов, связанных с целями и задачами функционирования системы [145, 148-150]. Это обусловлено тем, что 1) текущие темпы технологического развития в различных сферах деятельности приводят к тому, что требуется проявлять гибкость, мобильность и оперативность в управлении и принятии решений в целях повышения эффективности и производительности существующих нелинейных систем и процессов; 2) активное внедрение на производстве систем менеджмента качества требует организовывать управление деятельностью предприятия исходя из структуры процессов, реализуемых для достижения конкретных целей и задач предприятия. Следовательно, процессный подход в отношении декомпозиции сложных ИИУС производственных процессов со способностью к самоорганизации – это построение иерархической структуры компонентов ИИУС и управление этими компонентами для получения наилучших результатов и повышения эффективности ИИУС. Данный подход позволяет рассматривать компоненты как объекты управления, при этом важно учитывать их границы или события, которыми начинается и заканчивается работа компонента. Работа компонента является процессом для выполнения той или иной операции. Кроме этого, при декомпозиции сложной ИИУС необходимо выполнять следующие условия:

1. ИИУС представляет собой последовательно-параллельно взаимосвязанные компоненты, в свою очередь также состоящие из последовательно-параллельных элементов. Выполнение всех процессов приводит к достижению цели назначения ИИУС. Понятия компонент и элемент эквивалентны в настоящей диссертационной работе и определяются только уровнем их вложенности, т.к. при определении состава ИИУС решается задача определения всех компонентов.

2. Любой выделенный компонент имеет входной поток используемых ресурсов (информационных, энергетических или материальных).

3. Каждый компонент имеет свои внутренние правила, алгоритмы, законы и технологические решения преобразования входного воздействия в результат.

4. Каждый компонент имеет выходной поток (результат) и критерий завершения.

5. Состояние каждого компонента определено.

6. Каждый компонент имеет свои измеряемые показатели, по которым рассчитывается эффективность.

7. Состояние компонента изменяется во времени.

8. Компонент имеет исполнителя и владельца.

9. Результат выполнения процесса достигается за счет выполнения множества операций компонентом, который следует рассматривать как подчиненный элемент по отношению к процессу. Результаты выполнения функций не представляют самостоятельной ценности, поскольку не позволяют осуществлять управление процессом и повышать эффективность его работы.

При разбиении конкретной типовой ИИУС производственными процессами на компоненты используется референтная декомпозиция или модель компонентов аналогичной ИИУС. В качестве референтных моделей могут быть использованы: универсальная модель процессов ОВМ от Oracle [151], 8-процессная модель ВКГ [152] и 13-процессная модель ИСО/МЭК/ТО 15504 [153], референтная модель APQC [154] или требования стандартов управления

качеством ISO 9000:2000. Использование референтных моделей целесообразно при декомпозиции типовых ИИУС, в частности, для систем управления производственным процессом. Это существенно снижает затраты на создание иерархической структуры ИИУС. Если исследуется нетиповая сложная ИИУС, то применение референтных моделей затруднено. Для решения этих задач необходимо разработать методику декомпозиции ИИУС с использованием процессного подхода и положений теории систем.

Традиционно для разбиения ИИУС на компоненты используются следующие методы:

- функциональный метод – выделение компонентов исходя из функций, выполняемых ИИУС [155, 156];
- продуктовый метод – выделение компонентов исходя из результатов их работы [157];
- метод, основанный на анализе последовательности создания ценности [158, 159];
- матричный метод, в котором модель компонентов представляет собой матрицу, каждый элемент которой является отдельным компонентом, отражающим элементы и этапы жизненного цикла решаемой задачи [160, 161];

Для обобщения и универсальности используем новый метод разбиения ИИУС на компоненты, который является комбинацией существующих вместе с их преимуществами. Определим ограничения декомпозиции ИИУС:

1. Представление ИИУС в виде модели входов-выходов и разделение входных потоков на изменяемые, изменяющие и управляющие.
2. Классификация компонентов по их выходным потокам (результатам) на основные, обеспечивающие, управляющие и развивающие.
3. Последовательное разделение компонентов по их выходным потокам.

Представление ИИУС производственными процессами в виде модели входов-выходов основано на утверждениях общей теории систем, что любую

систему можно описать как преобразование входов в выходы [135]. Это справедливо как для отдельного компонента, так и для всей ИИУС. При этом компоненты классифицируются на изменяемые, изменяющие и управляющие. На рис.2.3 изображены входные и выходные потоки ИИУС [162].



Рис.2.3. Функциональная модель ИИУС

Классифицируя компоненты по выходным потокам выделим основные, обеспечивающие, управляющие и развивающие (табл.2.1).

Таблица 2.1. Описание компонентов, классифицированных по выходным потокам

Тип компонента	Назначение компонента	Результат компонента
Основной	Достижение результата	Решение задач и достижение цели ИИУС
Обеспечивающий	Обеспечение ресурсами других компонентов	Ресурсы для всех других типов компонентов
Управляющий	Управление ИИУС или другими компонентами	Планирование и управляющее воздействие для всех других типов компонентов ИИУС

Развивающий	Развитие системы или других компонентов	Изменения в системе, оптимизация и повышение эффективности функционирования компонентов и ИИУС в целом
-------------	-----------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------

Основные компоненты для функционирования требуют информационные, энергетические, материальные или человеческие ресурсы, которые поступают из внешней среды или от обеспечивающих компонентов (рис.2.4).



Рис.2.4. Взаимодействие основных и обеспечивающих компонентов

Функционирование ИИУС зависит от выходного потока управляющего компонента, связанного с планированием и внешними ограничениями окружающей среды. Основная работа ИИУС порождает информационные, энергетические или материальные потоки, которые обычно обрабатываются обеспечивающим компонентом, формирующим значения состояния других компонентов для управляющего компонента. Управляющий компонент регулирования оценивает ситуацию и при необходимости формирует корректирующее воздействие на основной компонент. Таким образом, управляющий и основной компонент связаны в единый контур управления.

Вышеописанные связи выделенных типов компонентов позволяют при

декомпозиции разбивать ИИУС производственными процессами на компоненты исходя от результатов работы ИИУС в целом.

На основе вышеизложенного получена основанная на принципах иерархичности концептуальная модель сложной ИИУС производственными процессами (рис.2.5).

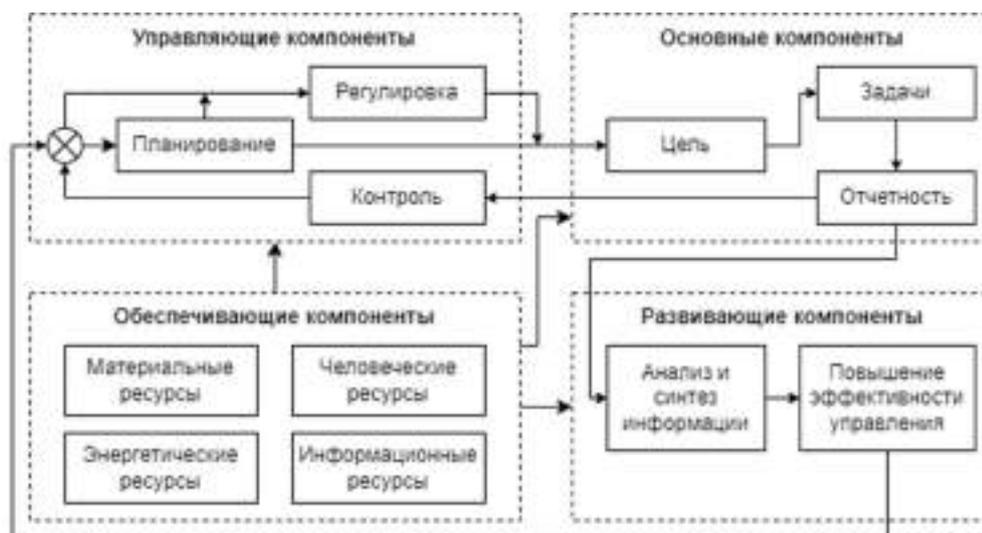


Рис.2.5. Концептуальная модель ИИУС

Резюмируя вышеописанное выделим этапы методики декомпозиции ИИУС с использованием процессного подхода и положений теории систем:

1. Определение результата работы ИИУС в целом и выделение основных компонентов.
2. Подробное описание основных компонентов: входные и выходные потоки, информационные потоки, планирование и состояние.
3. Описание обеспечивающих компонентов аналогично описанию основных компонентов.
4. Выделение и описание управляющих компонентов.
5. Выделение и описание развивающих компонентов.
6. Создание графического представления ИИУС в виде иерархической структуры, отражающей все группы компонентов и их взаимосвязи.
7. Верификация полученной иерархической структуры ИИУС.

Разработанная теоретические подходы к техническим решениям создания ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники позволяют учитывать связи между компонентами, их взаимозамещение, а также определять управляющие воздействий.

2.3 РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕН- НЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Под сущностью в настоящей работе понимается абстрактный или реальный компонент, группа компонентов, ИИУС, обладающих состоянием. Объект – это конкретное представление абстракции, к которому применяются операции и которое обладает состоянием, сохраняющим их результаты. Состояние – это совокупность всех свойств сущности, объекта или компонента и их текущие значения [163, 164].

Сущность обладает типом и ролью. Тип декларирует класс сущности. Класс – это описание совокупности объектов с одинаковыми характеристиками, операциями, отношениями и семантикой. Роль определяет значение сущности внутри класса, компонента или кооперации. Кооперация определяет взаимодействие и представляет совокупность сущностей или ролей, которые функционируют совместно.

Структурной сущностью или классификатором называется статическая часть модели, представляющая собой концептуальные или физические элементы.

Характеристика или свойство сущности – это абстракция вида данных или состояния, которое принимает объект. В каждый момент времени объект характеризуется конкретным значение каждой характеристики или свойства.

Операция, функция или метод – это какое-либо воздействие на сущность, объект или компонент с целью изменения его состояния.

В процессе исследования ИИУС и их моделей получено, что объекты

ИИУС и сами ИИУС находятся в постоянной взаимосвязи друг с другом. Такая взаимосвязь называется отношением между объектами, ИИУС и их комбинацией. Выделено четыре типа связей или отношений: зависимость, обобщение, ассоциация и реализация.

Зависимость – это отношение использования характеристик и операций одной сущности другой сущностью, но не наоборот. Если используемая сущность изменяется, то это отразится на использующей стороне, поскольку используемая сторона при этом предоставляет другой интерфейс для взаимодействия.

Математически отношение зависимости R между двумя множествами A и B представляется объединением этих множеств. При этом исходные множества перестают существовать. $R: A \cup B, A \rightarrow \emptyset, B \rightarrow \emptyset$. Отношение зависимости не приводит к созданию новых множеств или увеличению мощности существующих, а, следовательно, к увеличению мощности и развитию сущности. При постоянной величине мощности объединенного множества $|A \cup B|$ следует говорить о стабильности сущности. При $|A \cup B| \rightarrow 0$ следует говорить о деградации сущности. Отношение зависимости следует использовать с целью стабилизации состояния сущности за счет объединения множеств с понижающейся мощностью между собой или с множествами со стабильной мощностью.

Обобщение – это связь между обобщающей сущностью и более специфичной. К отношению обобщения относится связь между сущностью более высокого уровня (родительской) с сущностью следующего, более низкого уровня (дочерней). Дочерняя сущность наследует характеристики и операции родителя. Кроме этого, дочерняя сторона имеет дополнительные, отличные от родительских, характеристики и операции; некоторые характеристики и операции могут быть переопределены в процессе наследования; некоторые элементы могут быть недоступны для наследования. Множественные наборы обобщения являются интерпретацией иерархического представления ИИУС. При наследовании дочернее множество B увеличивает свою мощность за счет

элементов родительского множества A . Родительское и дочернее множество продолжают существовать отдельно в отношении наследования. $R: B \rightarrow A \cup B, A \rightarrow A$. При отношении обобщения увеличивается мощность одного множества за счет элементов другого, при этом второе множество продолжает существовать. Увеличению мощности множества говорит об увеличении количества состояний сущности, что приводит к ее развитию.

Ассоциация представляет собой структурную связь между сущностями, при которой одна сторона использует или формирует характеристики и операции другой. Допустимо применение отношения ассоциации к одной сущности. В отношении типа ассоциация используется роль сущности. При участии сущности в разных ассоциациях используется одна и та же или разные роли. При моделировании важно знать сколько объектов соединено одним отношением ассоциации. Этот параметр называется множественностью (кратностью) ассоциации и представляет собой диапазон целых чисел, указывающий возможное количество связанных объектов. Множественность определяется как единица (1), ноль или один (0..1), много (0..*), один или несколько (1..*) или устанавливается точно число (В частности, 5) или диапазон целых значений (В частности, 3..7). Ассоциация представляет собой пересечение двух множеств A и B с заданными коэффициентами, соответствующими кратности отношения, исходные множества продолжают существовать отдельно. $R: A \cap B, A \rightarrow A, B \rightarrow B$. Отношение ассоциации не приводит к образованию новых множеств и увеличению мощности сущности. Кроме того, в процессе ассоциации возможно поглощение одного множества другим (агрегация и композиция). Ассоциация поддерживает обмен информацией между сущностями.

Частным случаем ассоциации является отношения агрегации и композиции. Агрегация – это отношение между целым и его частями, при котором одна сущность является контейнером для других. При агрегации уничтожение контейнера не влечет за собой уничтожение содержимого. Агрегация представляет собой включение множества A в множество B . $R: A \subseteq B, B \rightarrow \emptyset, A \rightarrow A$. Композиция – это зависимый вариант агрегации, при котором устанавливается

жесткая зависимость между временем существования контейнера и его содержимым. Уничтожение контейнера влечет за собой уничтожение содержимого.
 $R: A \subseteq B, B \rightarrow \emptyset, A \rightarrow \emptyset$.

Реализация – это отношение между двумя сущностями, при котором одна сторона изменяет свои характеристики и операции в соответствии с требованиями другой стороны. Возможно применение реализации в отношении одной сущности. В этом случае изменения задаются другими компонентами сущности. Реализация – это отображение одного множества в другое. $R: A \rightarrow B$. Отношение реализации приводит к созданию сущностей с новыми характеристиками, операциями и отношениями. Данный тип отношений приводит к развитию сущностей.

Таким образом, математическое описание объекта ИИУС представляет собой алгебраическую систему E :

$$E = \langle A_1, \dots, A_n, V_1, \dots, V_n, O_1, \dots, O_m, R_1, \dots, R_k \rangle \quad (2.8)$$

где $A_i = \{a_{i1}, \dots, a_{ir}\}$ – множество характеристик объекта одного типа. Множество состоит из одного или нескольких элементов, число которых в соответствие с доказанным ранее не более чем счетно.

$V_i = \{v_{i1}, \dots, v_{ir}\}$ – множество значений характеристик. Каждый элемент множества состоит из одного значения или из кортежа значений $\{v_{ij,1}, \dots, v_{ij,p}\}$.

$O_i = \{(\text{название}), (\text{входные параметры}), (\text{выходные параметры})\}$ – множество функций, определенных для объекта. Абстрактно множество состоит из операций $\{(\text{создание}, (\text{входные параметры}), (\text{выходные параметры})), (\text{просмотр}, (\text{входные параметры}), (\text{выходные параметры})), (\text{изменение}, (\text{входные параметры}), (\text{выходные параметры})), (\text{удаление}, (\text{входные параметры}), (\text{выходные параметры}))\}$. Остальные функции являются их разновидностью. Элемент представляет собой упорядоченное множество, состоящее из названия функций, входных и выходных параметров.

$R_i = \{r_{i1}, \dots, r_{ik}\}$ – множество отношений между характеристиками, их

значениями и функциями. Отношение между характеристиками и их значениями является декартовым произведением двух множеств и представляет собой упорядоченную пару, состоящую из соответствующих элементов $r_{ij} = (a_{ij}, v_{ij})$. Отношения между характеристиками, операциями и между ними определяются в процессе моделирования объекта.

Количество элементов каждого множества не более чем счетно, так же, как и количество элементов алгебраической системы представления объекта.

Состояние объекта описывается значениями всех характеристик, входящих в его состав.

$$E_S = \langle (a_{1i}, v_{1i}), \dots, (a_{ni}, v_{ni}) \rangle \quad (2.9)$$

где (a_{ij}, v_{ij}) – упорядоченная пара характеристики и ее значения.

Аналогично, математическое описание ИИУС S представляет собой совокупность описаний объектов E .

$$S = \langle E_1, \dots, E_n, O_{s1}, \dots, O_{sm}, R_{s1}, \dots, R_{sk} \rangle \quad (2.10)$$

где E_i – алгебраическая система, описывающая объект ИИУС.

$O_{si} = \{(\text{название}), (\text{входные параметры}), (\text{выходные параметры})\}$ – множество функций, определенных для ИИУС. Функции ИИУС, зависят от функций, определенных для объектов ИИУС.

$R_{si} = \{r_{si1}, \dots, r_{sik}\}$ – множество отношений между объектами, операциями, объектами и операциями. Отношения определяются в процессе моделирования ИИУС. Отношения между объектами не зависят от отношений, определенных внутри объекта.

Количество элементов каждого множества не более чем счетно, так же, как и количество элементов алгебраической системы представления ИИУС.

Отношения R и R_s для двух абстрактных множеств C и D обладают свойствами:

1) $\forall c_i \in C \exists D_i \subset D: \forall d \in D_i \rightarrow (c_i, d) \in R \equiv c_i R d \wedge |D_i| \geq 1$. Отношение R (аналогично R_s) определяет принадлежность значений из множества D конкретным элементам множества C , причем каждому элементу соответствует

хотя бы одно значение.

2) $\forall c \in C \exists! d \in D: cRd$. Любой элемент из одного множества всегда связан с элементом из другого множества отношением R (аналогично R_s) и только с одним.

Остальные свойства отношений определяются в процессе моделирования ИИУС.

Состояние ИИУС представляет совокупность состояний объектов, входящих в состав ИИУС.

$$S_S = \langle E_{1S}, \dots, E_{nS} \rangle \quad (2.11)$$

где E_{iS} – описание состояния объекта, входящего в состав ИИУС.

Такое представление состояние ИИУС позволяет определить начальные условия возникновения неустойчивых состояний. Наличие отношений зависимости, агрегации (композиции) между объектами позволяет определить топологическое смешивание, зависимые объекты являются точками неустойчивого равновесия колебательного типа.

При моделировании состояний ИИУС целесообразно учитывать наиболее значимые, определяющие состояние компоненты, определенные в концептуальной модели, при этом пренебрежение незначительными элементами на точности модели ИИУС не сказывается. Рассмотрим модель значимого компонента N^E как объекта ИИУС:

$$N^E = \langle A_1^E, \dots, A_n^E, V_1^E, \dots, V_n^E, O_1^E, \dots, O_m^E, R_1^E, \dots, R_k^E \rangle \quad (2.12)$$

где A_i^E – множество характеристик компонента одного типа. $A_i^E \subseteq A_i$.

V_i^E – множество значений характеристик компонента. $V_i^E \subseteq V_i$.

O_i^E – множество функций, определенных для компонента. $O_i^E \subseteq O_i$.

R_i^E – отношения между элементами компонента. $R_i^E \subseteq R_i$. Доказательство: R_i^E представляет собой множество упорядоченных пар (a_i^E, v_i^E) , а R_i – (a_i, v_i) . Так как $A_i^E \subseteq A_i$ и $V_i^E \subseteq V_i$, значит и $\forall a_i^E \in A_i^E \rightarrow a_i^E \in A_i$, $\forall v_i^E \in V_i^E \rightarrow v_i^E \in V_i$. Кроме того, соответствующие свойства a_i^E и a_i , v_i^E и v_i равны. Тогда получаем, что соответствующие пары (a_i^E, v_i^E) и (a_i, v_i) равны между собой, а

значит $R_i^E \subseteq R_i$.

Алгебраические системы значимых компонентов одной ИИУС подобны и отображение $h: N_1^E \rightarrow N_2^E$ является гомоморфизмом, что подтверждает взаимозаменяемость компонентов одного иерархического уровня и функционального назначения. Докажем это. Поскольку для любой функции $o_{ij}^E \in O_i^E$ и любых элементов $a_{ij}^E \in A_i^E$ выполняется условие сохранения функции $h(a_{i1}^E \dots a_{in}^E o_{ij}^E) = h(a_{i1}^E) \dots h(a_{in}^E) o_{ij}^E$ при $n \geq 0$. Кроме этого выполняется условие сохранения отношений для элементов A_i^E и V_i^E , т.е. $(a_i^E, v_i^E) \in R_i^E$, то их образы $h(a_1^E, v_1^E), \dots, h(a_n^E, v_n^E)$ при гомоморфизме h во второй системе связаны тем же отношением $h(a_i^E, v_i^E) \in R_i^E$ при $n \geq 1$. Если $h(a_i^E, v_i^E) \in R_i^E$ и при этом $(a_i^E, v_i^E) \in R_i^E$, то такой гомоморфизм называется строгим.

Статический объект описывается совокупностью значений его характеристик, применяемых операций и отношений, которые не меняются с течением длительного периода времени (на протяжении всего жизненного цикла). Для динамического объекта при его описании с помощью алгебраической системы указывается множество возможных значений его характеристик. Состояние динамического объекта меняется с течением времени.

Состояние значимого компонента представляет собой совокупностью N_S^E значений его характеристик в определенный момент времени.

$$N_S^E = \langle (a_{1i}^E, v_{1i}^E), \dots, (a_{ni}^E, v_{ni}^E) \rangle \quad (2.13)$$

где (a_{ij}^E, v_{ij}^E) – упорядоченная пара характеристики компонента и ее значение. $N_S^E \subset N^E$ поскольку $(a_{ij}^E, v_{ij}^E) \in N^E$. Количество состояний компонента равно произведению количества возможных значений для каждой характеристики компонента $K_S = \prod_{i=1}^{K_A} |V_i|$, где $K_A = \sum_{i=1}^n |A_i|$ – количество характеристик компонента по разным типам. Поскольку состояние компонента в бесконечно малый момент времени определено и статично, можно считать, что любой компонент в бесконечно малый момент времени является статическим.

Для повышения эффективности ИИУС необходимо контролировать ее

состояние путем измерения основных параметров системы. Поскольку контроль производится значимыми компонентами, в работе предложена уточненная модель ИИУС P^S , представляющая совокупность значимых компонентов, их функций и отношений между ними.

$$P^S = \langle N_1^E, \dots, N_n^E, O_{s1}^S, \dots, O_{sm}^S, R_{s1}^S, \dots, R_{sk}^S \rangle \quad (2.14)$$

где N_i^E – множество значимых компонентов ИИУС.

O_{si}^S – множество функций, определенных для ИИУС. $O_{si}^S \subseteq O_{si}$.

R_{si}^S – множество отношений между компонентами ИИУС. $R_{si}^S \subseteq R_{si}$.

ИИУС, построенные на основе одной абстрактной модели, подобны и отображение $g: P_1^S \rightarrow P_2^S$ является гомоморфизмом. Причем, если $h: N_1^E \rightarrow N_2^E$ и $g: P_1^S \rightarrow P_2^S$ – гомоморфизмы, то и композиция $h \circ g: N_1^E \rightarrow P_2^S$ – гомоморфизм. Данное утверждение означает, что при отображении компонента из одной подобной ИИУС в другую сохраняются функции и отношения с ним связанные.

Состояние конкретной реализации ИИУС описывается совокупностью состояний компонентов, входящих в ее состав.

$$P_S^S = \langle N_{1S}^E, \dots, N_{nS}^E \rangle \quad (2.15)$$

где N_{iS}^E – множество состояний компонентов конкретной ИИУС.

Роль описывается набором характеристик, операций и отношений, определенных в сущности для решения определенной задачи ИИУС (для выполнения определенной функции).

$$E_R = \langle A_{1R}, \dots, A_{nR}, V_{1R}, \dots, V_{nR}, O_{1R}, \dots, O_{mR}, R_{1R}, \dots, R_{kR} \rangle \quad (2.16)$$

где A_{iR} – множество характеристик сущности одного типа.

V_{iR} – множество значений характеристик.

O_{iR} – множество операций, определенных для сущности.

R_{iR} – множество отношений между характеристиками, их значениями и операциями. Отношения между характеристиками, операциями и между ними определяются в процессе моделирования роли сущности.

Роль ИИУС определяется совокупностью ролей сущностей, входящих в

ее состав.

$$S_R = \langle E_{1R}, \dots, E_{nR} \rangle \quad (2.17)$$

где E_{iR} – описание роли сущности.

Роль компонента и конкретной реализации ИИУС определяются совокупностями N_R^E и P_R^S .

$$N_R^E = \langle A_{1R}^E, \dots, A_{nR}^E, V_{1R}^E, \dots, V_{nR}^E, O_{1R}^E, \dots, O_{mR}^E, R_{1R}^E, \dots, R_{kR}^E \rangle \quad (2.18)$$

$$P_R^S = \langle N_{1R}^E, \dots, N_{nR}^E \rangle \quad (2.19)$$

где A_{iR}^E – характеристики роли компонента, $A_{iR}^E \subseteq A_{iR}$.

V_{iR}^E – множество значений характеристик роли компонента, $V_{iR}^E \subseteq V_{iR}$.

O_{iR}^E – множество операций, определенных для роли компонента, $O_{iR}^E \subseteq O_{iR}$.

R_{iR}^E – множество отношений между элементами роли компонента, $R_{iR}^E \subseteq R_{iR}$.

N_{iR}^E – описание ролей компонентов ИИУС.

Роль представляет характеристики и операции как средства выполнения обязательств или соглашений компонентами или ИИУС по отношению к другим компонентам или ИИУС. При моделировании следует разделять компоненты, на которые приходится большая часть обязательств или соглашений, на меньшие и объединять в более крупные, на которые приходятся тривиальные обязательства. Необходимо определить для каждого компонента оптимальный набор соглашений и обязательств, что отразится в оптимальном наборе характеристик и функций. Для определения компонентов, характеристик и функций применяется онтологический, семантический анализ предметной области или их совокупность.

В результате исследования полученных математических описаний компонентов ИИУС, самой ИИУС, ее состояний выявлено:

- $A_{iS}^E \subseteq A_i^E \subseteq A_i$, $V_{iS}^E \subseteq V_i^E \subseteq V_i$, $O_i^E \subseteq O_i$, $R_i^E \subseteq R_i$. Следовательно, $N_S^E \subseteq E_S$ – состояние компонента является одним из определенных состояний объ-

екта; $N^E \subseteq E$ – компонент представляет полный или частичный набор элементов, описанный в объекте ИИУС. При единственном значении характеристики объект и компонент являются статичными. Элементы компонента и объекта связаны отношением композиции, т.е. при уничтожении компонента или объекта – характеристики, их значения, функции и отношения уничтожаются. $N_S^E \subseteq E_S$ и $N^E \subseteq E$ являются отношениями агрегации: при уничтожении объекта компонент продолжает существовать. Алгебраические системы компонента и объекта подобны и отображение $f: E \rightarrow N^E$ является гомоморфизмом.

- $N_S^E \subseteq N^E \subseteq E$, $O_{si}^S \subseteq O_{si}$, $R_{si}^S \subseteq R_{si}$. Следовательно, $P_S^S \subseteq S_S$ – состояние конкретной реализации ИИУС является одним из определенных состояний абстрактной ИИУС; $N^E \subseteq P^S \subseteq S$ – компонент представляет полный или частичный набор элементов, описанных в сущности. При единственном значении состояний компонентов ИИУС является статичной. $P_S^S \subseteq S_S$, $N^E \subseteq P^S \subseteq S$ – отношения агрегации, т.е. при уничтожении абстрактной составляющей вложения продолжают существовать. Математическое представление ИИУС и конкретной реализации ИИУС подобны и отображение $p: S \rightarrow P^S$ является гомоморфизмом.

- количество состояний объекта определяется произведением количества возможных значений для каждой характеристики объекта $K_{SE} = \prod_{i=1}^{K_{AE}} |V_i|$, где $K_{AE} = \sum_{i=1}^n [A_i]$ – количество характеристик объекта по разным типам. Количество состояний компонента равно произведению количества значений для каждой характеристики компонента $K_S = \prod_{i=1}^{K_A} |V_i|$, где $K_A = \sum_{i=1}^n [A_i]$ – количество характеристик компонента по разным типам. Причем, $K_S \leq K_{SE}$ и $K_A \leq K_{AE}$. Количество состояний ИИУС равно произведению количества возможных значений для каждого объекта $K_{SS} = \prod_{i=1}^n |K_{iSE}|$, количество состояний конкретной реализации ИИУС - $K_{PS} = \prod_{i=1}^n |K_{iS}|$, $K_{PS} \leq K_{SS}$. Если возможное значение характеристики представляет собой диапазон множества рациональных чисел, то количество состояний стремится к бесконечности. Следова-

тельно, для увеличения количества состояний компонента или объекта необходимо увеличивать количество возможных значений для характеристики и/или увеличивать количество характеристик. Для этого необходимо создавать отношения обобщения и реализации между характеристиками и операциями. Аналогично, для увеличения состояний ИИУС необходимо увеличивать количество сущностей и/или количество состояний сущностей, что достигается путем создания связей обобщения и реализации. Увеличение количества отношений обобщения и реализации возможно за счет перевода отношений зависимости и ассоциации в соответствующие.

Приведенные математические представления ИИУС и их свойства подтверждают полученные ранее выводы о иерархическом представлении ИИУС.

2.4 РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ УПРАВЛЯЕМОСТИ И НАБЛЮДАЕМОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Иерархическая структура ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, полученная в результате применения методики декомпозиции ИИУС с использованием процессного подхода и положений теории систем, соответствует модели системы автоматического управления в теории систем (рис.2.6), следовательно, к иерархической структуре ИИУС применяются принципы и критерии теории автоматического управления [164, 165].

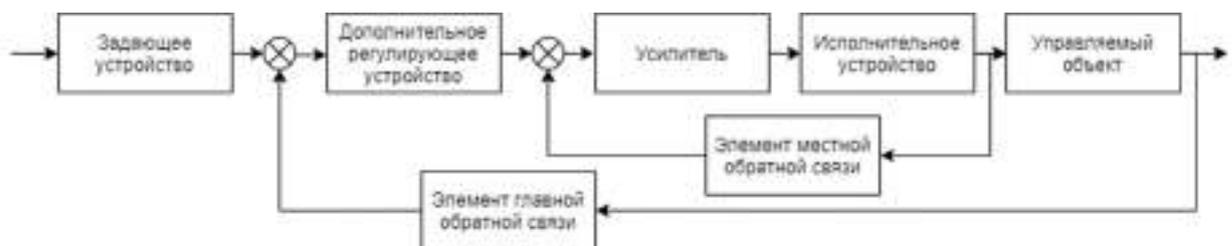


Рис.2.6. Обобщенная типовая схема системы автоматического управления

В пространстве состояний ИИУС n -го порядка задается системой из n

уравнений 1-го порядка:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t)) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t)) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Или

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(t, x(t), u(t)) \\ y(t) &= h(t, x(t), u(t)) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Где первое уравнение – это уравнение состояния, а второе – уравнение выхода. $x(t)$ – вектор состояния ИИУС, $u(t)$ – вектор управления, $y(t)$ – вектор выходов.

Для ИИУС возможна линеаризация описания процесса в окрестности рабочей точки (\tilde{x}, \tilde{u}) .

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A\partial x + B\partial u \\ \partial y &= C\partial x + D\partial u \end{aligned} \quad (2.22)$$

Где $A = \frac{\partial f}{\partial x}$ – матрица системы, $B = \frac{\partial f}{\partial u}$ – матрица управления, $C = \frac{\partial h}{\partial x}$ – матрица выхода, $D = \frac{\partial h}{\partial u}$ – матрица прямой связи.

Известно, что система управляема, если существует такое управляющее воздействие $u(t)$, которое переводит систему из состояния $x_0(t)$ в состояние $x_1(t)$ за конечный период времени. Система полностью управляема, если все компоненты ее вектора состояния управляемы.

Согласно критерию управляемости Калмана для системы порядка n с p входами и q выходами $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $y(t) \in \mathbb{R}^q$, $u(t) \in \mathbb{R}^p$, $\dim[A] = n \times n$, $\dim[B] = n \times p$, $\dim[C] = q \times n$, $\dim[D] = q \times p$, $\dot{x}(t) := \frac{dx(t)}{dt}$ существует матрица управляемости $[B \ AB \ A^2B \ .. \ A^{n-1}B]$. Если ранг матрицы управляемости равен n , система является полностью управляемой.

Известно, что система наблюдаема, если на конечном интервале времени по выходу системы в конце этого интервала $y(t_1) \in \mathbb{R}^q$ при известном управляющем воздействии $u(t) \in \mathbb{R}^p$ определяются все начальные компо-

ненты вектора состояния $x(t_0) \in \mathbb{R}^n$. Наблюдаемыми состояниями системы являются те компоненты вектора состояния, которые восстанавливаются по приведенным выше условиям.

Согласно критерию наблюдаемости теории управления, система явля-

ется наблюдаемой, если ранг матрицы наблюдаемости $\begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$ равен n .

Таким образом, дополняя критерий Калмана и критерий наблюдаемости из теории управления свойствами разработанной в настоящей диссертационной работе обобщенной модели ИИУС, получим утверждение, что объект является управляемым и наблюдаемым, если имеет конечное число состояний и между его характеристиками отсутствуют отношения зависимости, агрегации и композиции, а ИИУС полностью управляема и наблюдаема, если управляемы и наблюдаемы все входящие в ее состав объекты и отсутствуют отношения зависимости, агрегации и композиции между ними.

На основе полученного утверждения модифицированный метод оценки управляемости и наблюдаемости ИИУС заключается в:

1. Определение количества состояний объекта.
2. Выявление отношений зависимости, агрегации и композиции между характеристиками.
3. Если количество состояний конечно и отношения зависимости, агрегации и композиции между характеристиками отсутствуют, то объект полностью управляем и наблюдаем.
4. Если между характеристиками объекта присутствуют отношения зависимости, агрегации и композиции, то объект управляем и наблюдаем частично. Степень управляемости и наблюдаемости определяется количеством независимых характеристик к общему числу характеристик.

Таким образом, разработанный метод позволит оценить управляемость и наблюдаемость ИИУС и ее отдельных компонентов.

2.5 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ДЛЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

Динамика существования компонента или ИИУС определяется вектором развития $\vec{d} = (t, K)$, который определяется количеством состояний компонента или ИИУС K в определенный момент времени t . Направление вектора определяется изменением количества состояний с течением времени (рис.2.7). Компонент или ИИУС могут развиваться (количество состояний увеличивается с течением времени), оставаться стабильным (количество состояний не изменяется) и деградировать (количество состояний уменьшается) [166].

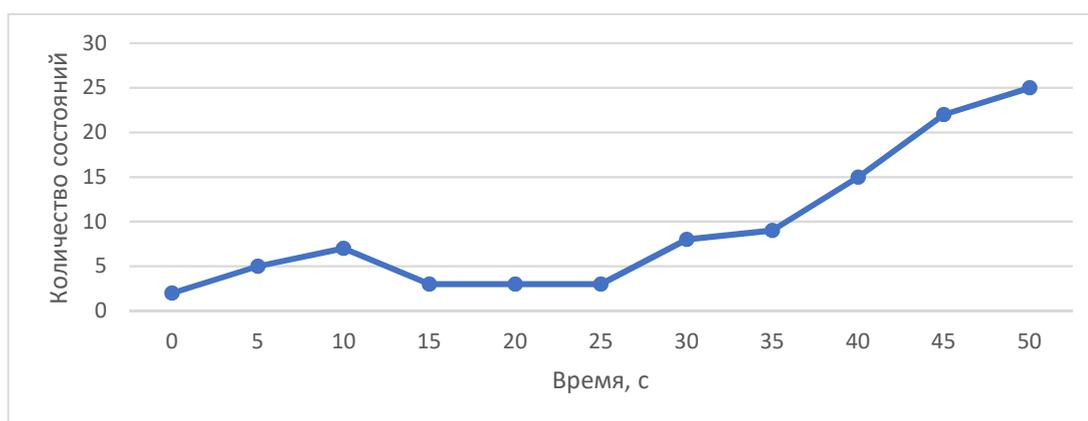


Рис.2.7. Динамика существования компонента или ИИУС

В процессе существования компонента или ИИУС в результате выполнения операции возможно неустойчивое состояние, которое называется динамическим или детерминированным хаосом. Развитие хаоса приводит к разрушению компонента или ИИУС, а переход к устойчивому состоянию позволяет создать новые состояния компонента или ИИУС, т.е. приводит к развитию. Таким образом, возможно использование хаоса как формы развития ИИУС различной сложности. Управление хаосом осуществляется с помощью подавления и контроля. Подавление организуется за счет ввода ограничений и ведет

к снижению количества состояний компонента или ИИУС, т.е. к деградации. Контролирование хаоса позволяет управлять развитием хаоса до определенного значения, затем стабилизировать и перевести ИИУС в устойчивое состояние.

Управление хаосом заключается в следующем (рис.2.8):

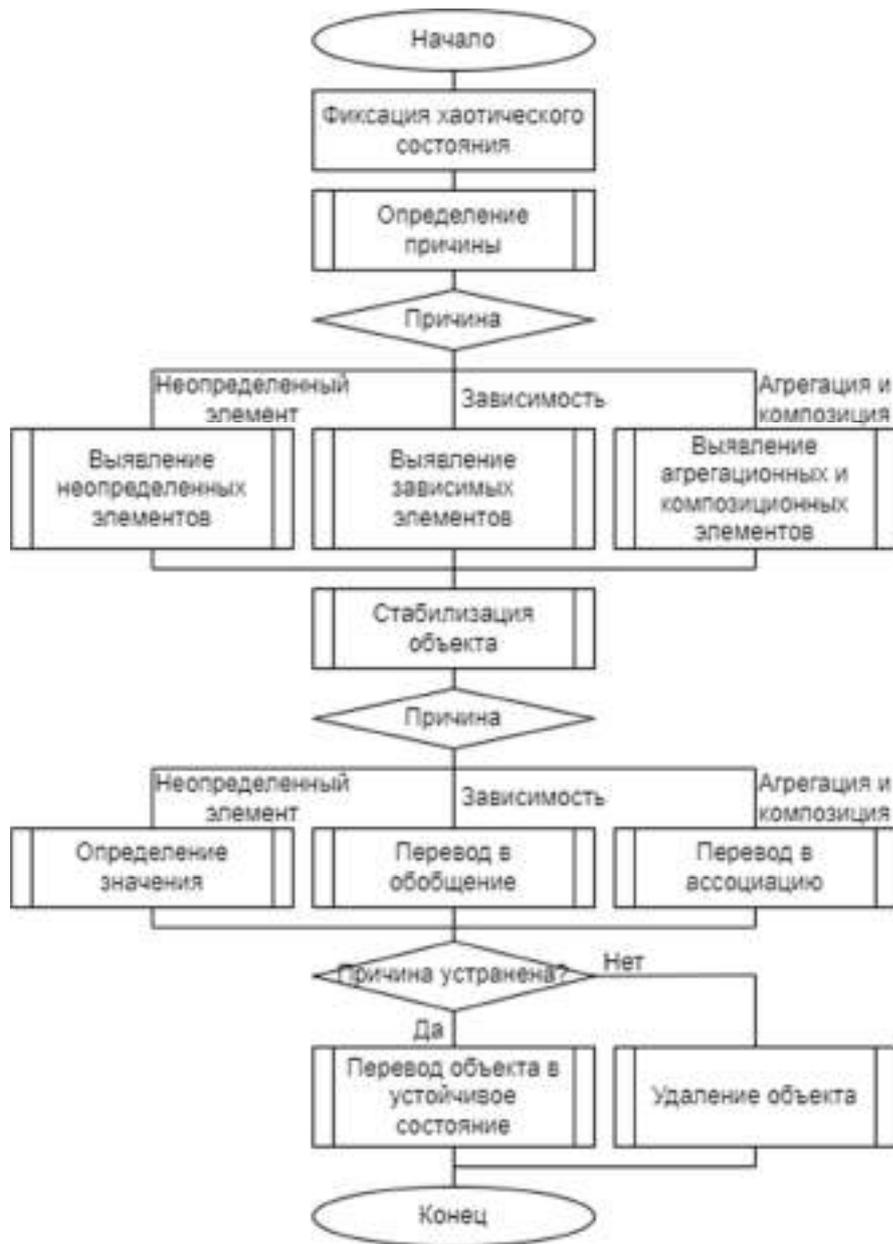


Рис.2.8. Блок-схема алгоритма управления хаосом ИИУС

1) Фиксация наступления хаотического состояния. При хаотическом состоянии ИИУС или компонент не могут перейти в определенное состояние.

$$O_i^E: N_{iS}^E \rightarrow N_{(i+1)S}^E; O_{Si}^S: P_{iS}^S \rightarrow P_{(i+1)S}^S \quad (2.23)$$

2) Поиск причины хаотического состояния. Состояние компонента определяется набором характеристик и их значений, а состояние ИИУС – состояниями компонентов. Следовательно, состояние компонента является первичным в развитии хаоса ИИУС. Состояние компонента $N_S^E = \langle (a_{1i}^E, v_{1i}^E), \dots, (a_{ni}^E, v_{ni}^E) \rangle$ состоит из упорядоченных пар (a_{ij}^E, v_{ij}^E) , формируемых в результате функции O_i^E и с учетом отношений между характеристиками R_i^E . Таким образом, хаотичность состояния заключается в невозможности формирования пары (a_{ij}^E, v_{ij}^E) .

$$O_i^E: a_{ij}^E R_j^E v_{ij}^E \rightarrow (a_{ij}^E, v_{ij}^E) \quad (2.24)$$

Причинами являются:

- полученное в результате выполнения функции O_i^E значение v_{ij}^E не определено в математической модели компонента или ИИУС, т.е. $v_{ij}^E \notin V_i^E \subseteq V_i$;

- отношение зависимости между характеристиками приводит к получению объединенного множества характеристик, состоящего из характеристик использующего и используемого множества, которые перестают существовать. При этом соответствующие множества значений характеристик продолжают существовать и в результате выполнения функции O_i^E не определяется соответствие между a_{ij}^E и v_{ij}^E ;

$$R_i^E: A_i^E \cup A_j^E, A_i^E \rightarrow \emptyset, A_j^E \rightarrow \emptyset, V_i^E \rightarrow V_i^E, V_j^E \rightarrow V_j^E, a_{ij}^E R_i^E v_{ji}^E \rightarrow (a_{ij}^E, v_{ji}^E) \quad (2.25)$$

- отношения агрегации или композиции приводит к слиянию характеристик и их значений, причем в случае совпадения элементов характеристик значения элемента агрегируемой характеристики заменяется соответствующим значением (или пороговым значением) агрегирующей;

$$R_i^E: A_i^E \subseteq A_j^E, V_i^E \subseteq V_j^E, \forall v_i^E \in V_i^E \neq v_j^E \in V_j^E \rightarrow v_i^E = v_j^E \quad (2.26)$$

Таким образом, поиск причин хаотического состояния заключается в выявлении характеристик компонента, значение которых не определено, а также характеристик, связанных с ними отношениями зависимости, агрегации или

композиции.

3) Стабилизация неустойчивого состояния компонента заключается в выявлении и отмене операций, которые используют в качестве входных или выходных параметров характеристики, выявленные в процессе поиска причин хаоса.

4) Устранение причины хаотического состояния заключается в формировании упорядоченной пары характеристики и ее значения (a_{ij}^E, v_{ij}^E) .

- В случае неопределенности полученного значения характеристики в модели $v_{ij}^E \notin V_i^E \subseteq V_i$, необходимо оценить возможность существования полученного значения характеристики. Если значение возможно, то его следует добавить в множество значений характеристики для компонента и для объекта. Если значение не возможно, то следует добавить условия для входных и выходных значений функций, ограничивающих формирование полученного значения характеристики.

- Отношение зависимости необходимо перевести в отношение обобщения путем разделения объединенного (зависимого) множества на два самостоятельных. В качестве шаблона разделения следует использовать соответствующие множества значений зависимых характеристик. Возможно добавление характеристик и их значений в формируемые множества.

- Отношение агрегации или композиции следует перевести в отношение ассоциации с выделением собственных значений для разделяемых пересекающихся характеристик.

5) Перевод состояния компонента в устойчивое с формированием новых возможных состояний ИИУС.

- При положительной оценки возможности существования нового значения характеристики происходит его добавление в возможные значения, что приводит к увеличению возможных состояний объекта. Установление ограничений не приводит к увеличению возможных состояний.

- В случае успешного перевода отношений зависимости в отношения

обобщения происходит формирование новых множеств характеристик с новыми значениями, что приводит к увеличению возможных состояний компонента. При невозможности изменения отношений зависимости необходимо поддерживать отмену функций, использующих зависимые характеристики, для дальнейшей стабилизации компонента. При отсутствии стабилизации хаотическое состояние развивается, что приведет к разрушению компонента. В процессе стабилизации возможно создание аналогичного замещающего набора характеристик с целью замены зависимых. Возможно выполнение функции удаления характеристики в случае отсутствия стабилизации для сохранения жизнеспособности компонента.

- При переводе отношений агрегации или композиции в отношения ассоциации происходит формирование новых множеств характеристик и их значений, что приводит к появлению новых возможных состояний компонента. При невозможности перевода отношений необходимо сохранять наложенные ограничения для стабилизации состояния компонента, в противном случае развитие хаоса приведет к разрушению множества характеристик компонента и ИИУС.

Стабилизация временная мера, предназначенная для накопления ресурсных характеристик и их значений, необходимых для продолжения развития и завершения хаоса и перехода в устойчивое состояние с формированием новых наборов состояний. Стабилизация производится элементом, находящемся на более высоком иерархическом уровне.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет создать и определить множество состояний, ограничений и условий перехода из одного состояния в другое, что, в свою очередь, повышает управляемость ИИУС

При завершении алгоритма управления устойчивостью ИИУС с удалением нестабильного компонента необходимо определить возможные состояния ИИУС и оценить возможность их восстановления. В случае восстановления компонента и ИИУС необходимо определить работы по восстановлению

и их последовательность, в противном случае – выполнить операцию по удалению компонента или ИИУС.

Восстановление компонента заключается в:

1) сравнение совокупности элементов компонента с абстрактной моделью с целью выявления недостающих элементов $E \setminus N^E$;

2) среди элементов компонента могут быть выделены обеспечивающие (ресурсные), основные, управляющие и развивающие элементы. Обеспечивающие элементы подлежат восстановлению в первую очередь, затем восстанавливаются управляющие и основные элементы; развивающие элементы восстанавливаются в последнюю очередь;

3) восстановление элементов производится последовательно: характеристика, значения характеристики, отношения между характеристиками, функции. Восстановление элемента заключается в отображении характеристик и их значений, отношений и операций из абстрактной модели в компонент. После восстановления характеристик, их значений, отношений необходимо выполнять функции, в которых восстановленные характеристики являются выходными параметрами для их активации, затем – входными.

4) в случае невозможности выполнения операций по активации характеристик и их значений необходимо создать отношения зависимости, агрегации или композиции между неактивной и активной характеристикой с целью восстановления и активации значений характеристики. Созданные отношения после активации необходимо перевести в отношения обобщения или ассоциации.

5) при отсутствии положительной динамики восстановительного процесса необходимо выполнить операцию по удалению характеристик.

6) при отсутствии самостоятельного функционирования компонента необходимо создать отношения зависимости, агрегации или композиции с другим компонентом или ИИУС.

Аналогично, восстановление ИИУС заключается в:

1) сравнение совокупности элементов конкретной ИИУС с абстрактной

моделью с целью выявления недостающих компонентов, функций и отношений $S \setminus P^S$;

2) выделение среди компонентов ИИУС обеспечивающих, управляющих, основных и развивающих;

3) отображение недостающих компонентов из абстрактной модели; выполнение функций, в которых компоненты являются выходными параметрами, а затем – входным;

4) в случае невозможности активации компонента конкретной ИИУС с помощью функций необходимо создать отношения зависимости, агрегации или композиции с другими компонентами ИИУС. После активации компонента отношения следует перевести в обобщение или ассоциацию;

5) при отсутствии положительной динамики по восстановлению компонента необходимо выполнить операцию по его удалению из ИИУС;

6) при отсутствии самостоятельного функционирования ИИУС необходимо создать отношения зависимости, агрегации или композиции с другими ИИУС.

Описанное выше позволяет утверждать, что управляемый динамический хаос является эффективным средством развития и повышения устойчивости компонента или ИИУС. Но имеет ряд существенных недостатков:

- находясь в хаотическом состоянии компонент или ИИУС не могут функционировать в полном объеме, особенно в процессе стабилизации, что приводит к снижению общей эффективности ИИУС;

- стабилизация требует дополнительных расходов ресурсов;

- хаотическое состояние может быть длительным по времени;

- в случае потери управления и контроля над развитием хаотического состояния возможно разрушение компонента или ИИУС, или их уничтожение.

Частично устранить указанные недостатки можно с помощью искусственного инициируемого хаотического состояния. Для этого необходимо определить возмущающее воздействие и компонент (или характеристику), на

который это воздействие оказывается. Для инициирования управляемого процесса по переводу компонента в неустойчивое состояние необходимо:

- 1) выявить неопределенные значения характеристик, которые могут быть получены в результате выполнения функций компонента;
- 2) выявить отношения зависимости, агрегации или композиции;
- 3) определить теряемые в отношениях зависимости, агрегации или композиции значения характеристик компонента;
- 4) определить функции, в которых используются определенные ранее характеристики;
- 5) определить наименее и наиболее используемые характеристики, а также их тип: обеспечивающие, управляющие, основные и развивающие. Воздействие на наименее используемые, развивающие характеристики вызовет незначительное хаотическое состояние; воздействие на наиболее используемые, обеспечивающие, управляющие характеристики вызовет значительное отклонение от устойчивого состояния; воздействие на основные характеристики может привести к уничтожению объекта;
- 5) сформировать управляющее воздействие, которое вызовет неопределенное значение характеристики компонента;
- б) определение действий по переводу компонента в устойчивое состояние.

Хаотическое состояние ИИУС инициируется хаотическим состоянием компонентов, в нее входящих.

Предварительный расчет хаотического состояния позволит сократить его временной период, затраты на период стабилизации, снизить вероятность потери контроля над неустойчивым состоянием.

Более эффективный способ развития ИИУС и повышения ее устойчивости является постоянный (периодический) мониторинг состояний компонентов ИИУС, их отношений [167-170]. Результаты такого мониторинга позволят определять неустойчивые компоненты, отношения зависимости, ассо-

циации (агрегации и композиции) и своевременно изменить состояние компонента на устойчивое, отношения зависимости на отношение обобщения, а ассоциации – на отношение реализации.

Способ развития ИИУС на основе мониторинга заключается в следующем:

- 1) Выявление неустойчивых компонентов.
- 2) Выявление отношений зависимости, ассоциации, агрегации и композиции.
- 3) Перевод неустойчивых компонентов в устойчивое состояние.
- 4) Перевод отношений зависимости в обобщение, ассоциации – в реализацию, агрегации и композиции – в ассоциации, а затем в реализацию.

Аналогично происходит развитие компонента.

Данный способ имеет ряд преимуществ:

- прогнозирование и предупреждение хаотического состояния;
- приводит к устойчивому развитию компонента или ИИУС;
- ИИУС не снижает своей функциональности.

Недостатками является:

- затраты на мониторинг ИИУС и анализ его результатов. Данный недостаток может быть нивелирован за счет автоматизации процесса мониторинга и анализа его результатов.

В процессе развития компонента или ИИУС необходимо создавать новые элементы внутри компонента или ИИУС и/или внедрять элементы из других компонентов или ИИУС. Создание компонента внутри системы происходит с формированием отношений зависимости с другими компонентами, а внедрение – с отношениями ассоциации, агрегации или композиции. Которые затем необходимо перевести в отношения обобщения, ассоциации и реализации соответственно.

Устойчивость компонента или ИИУС заключается в формировании ограничений на входные параметры для операций и сокращение количества

отношений зависимости и агрегации или композиции между характеристиками компонента или компонентами в ИИУС.

Изменение состояния компонента или ИИУС осуществляется в соответствии с иерархической структурой, полученной в результате применения разработанных теоретических подходов к техническим решениям создания ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектронике с использованием процессного подхода и положений теории систем. Переход от состояния к состоянию осуществляется с верхнего уровня иерархической структуры ИИУС к нижним или наоборот. Нарушение порядка изменения состояния приводит к динамическому хаосу, что следует из описанных выше положений.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработаны и исследованы принципы иерархического построения компонентов информационно-измерительных и управляющих систем как объектов управления с заданными граничными условиями. Приводится доказательство конечности и счетности уровней и элементов иерархической модели ИИУС.

2. Разработаны теоретических подходов к техническим решениям создания информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектронике с использованием процессного подхода и положений теории систем. На основе полученных результатов разработана концептуальная модель ИИУС, позволяющая представлять компоненты ИИУС как объекты управления с определенными граничными условиями. В результате применения концептуальной модели появляется возможность моделирования поведения компонентов ИИУС, а также определение управляющих воздействий.

3. Разработана обобщенная математическая модель ИИУС, включающая формализацию хаотического состояния системы, на основе теории множеств,

графов, алгебраических систем, теории хаоса, фракталов и применения объектно-ориентированной парадигмы.

4. Разработан модифицированный метод оценки управляемости и наблюдаемости ИИУС, позволяющий оценить управляемость и наблюдаемость системы как в целом, так и отдельных компонентов.

5. Разработан алгоритм управления устойчивостью ИИУС. Алгоритм основан на анализе характеристик ИИУС и связей между ними.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА И
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

3.1 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРАНИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Иерархическая структура ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники и разработанная обобщенная математическая модель ИИУС позволяют рассматривать полученные объекты в бесконечно малый момент времени dt как замкнутую систему. Следовательно, согласно законам сохранения [171], в системе формируется ответная компенсационная реакция на внешнее воздействие.

Для наглядности представим ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники в виде модели рычага I типа – простейшего физического механизма (рис.3.1). Рычаг представляет собой жесткую балку, имеющую возможность вращаться вокруг точки опоры. Части балки от точки приложения сил до точки опоры называются плечами рычага. Точка опоры может свободно перемещаться вдоль рычага и находится между двумя закрепленными с одной стороны пружинами жесткости k .

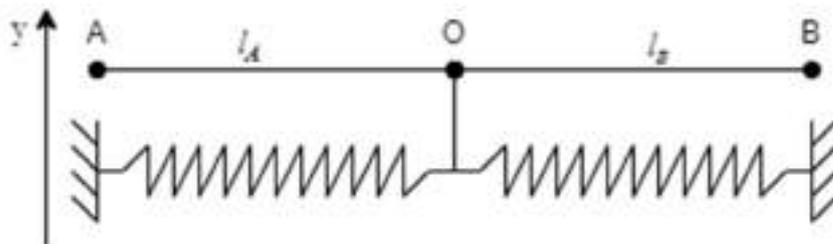


Рис.3.1. Графическое изображение модели состояния ИИУС

К точке А прикладывается внешнее воздействие на ИИУС, а в точке В возникает ответная реакция. Точка О – точка опоры. Плечо рычага l_A представляет степень реактивности ИИУС, т.е. насколько ИИУС способна реагировать на внешнее управляющее воздействие. Плечо l_B отображает статичность ИИУС, т.е. насколько система способна поглощать внешнее управляющее воздействие и оставаться в равновесии. Физически реактивность и статичность ИИУС представлена в виде двух пружин с жесткостью k . Коэффициент k отражает ригидность ИИУС – внешнее управляющее воздействие на ИИУС, изменяющее ее внутреннее состояние на единицу измерения состояния. Ось y показывает направление действия возникающих в ИИУС производственным процессом реакций. Установим, что совпадающее с направлением оси y действие реакции направлено внутрь на изменение внутреннего состояния ИИУС. И против оси y – действие реакции направлено от ИИУС производственным процессом с целью изменения состояния окружающей среды. Кроме того, вернуть рычаг в состояние равновесия возможно или созданием компенсационного воздействия в точке В, или перемещение точки опоры О. Перемещение точки опоры О в сторону точки А, т.е. уменьшению реактивности ИИУС и увеличению статичности, соответствует накоплению энергии в ИИУС производственным процессом, а перемещение в сторону точки В, увеличению реактивности и уменьшению статичности, - выделению энергии. Физически процесс накопления энергии соответствует совершению работы по сжатию пружины реактивности и растяжению пружины статичности. Аналогично процесс выделения энергии соответствует растяжению пружины реактивности и сжатию пружины статичности ИИУС. При этом действие силы упругости обеих пружин и в том и в другом случае направлено к точке опоры, т.е. к возвращению в состояние равновесия.

Длина рычага $l = l_A + l_B$ соответствует устойчивости ИИУС производственным процессом – способности ИИУС выдерживать внешнее управляющее воздействие и возвращаться в состояние равновесия.

В момент времени dt на ИИУС, находящейся в равновесии, производится внешнее управляющее воздействие \vec{F}_A , которое выводит ИИУС из состояния равновесия. Для компенсации ответной реакции \vec{F}_A и возвращения ИИУС в состояние равновесия возникнет реакция \vec{F}_B (рис.3.2).

Рычаг находится в равновесии, если векторная сумма моментов сил, приложенных к нему, равна 0.

$$F_A l_A = F_B l_B \text{ или } F_B = \frac{F_A l_A}{l_B} \quad (3.1)$$

Для \vec{F}_A направленной во внешнюю среду, против направления оси y , рассуждения аналогичны.

$$\lim_{l_B \rightarrow l_A} F_B = \lim_{l_B \rightarrow l_A} \frac{F_A l_A}{l_B} = F_A \quad (3.2)$$

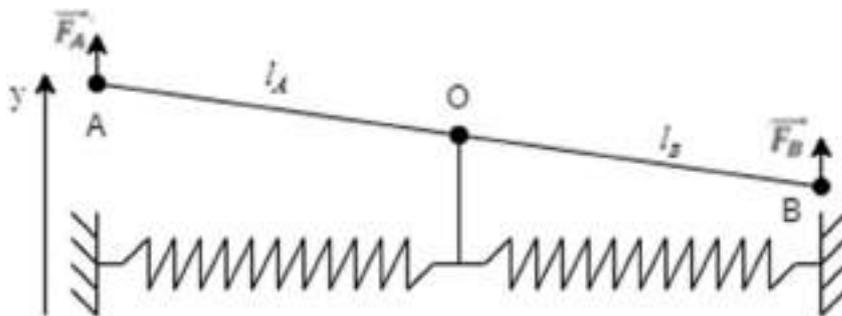


Рис.3.2. Внешнее воздействие и компенсационная реакция

Тогда, при стремлении к равенству плеч рычага (3.2), или равенстве реактивности и статичности ИИУС, внешнее управляющее воздействие и ответная реакция на него равны. Это идеальное равновесное состояние ИИУС производственным процессом. Поглощаемая и выделяемая ИИУС энергия равны.

Рассмотрим другие возможные граничные состояния ИИУС.

$$\lim_{l_B \rightarrow 0} F_B = \lim_{l_B \rightarrow 0} \frac{F_A l_A}{l_B} = \infty \quad (3.3)$$

При стремлении статичности ИИУС к 0 $l_B \rightarrow 0$ согласно (3.3) ответная реакция ИИУС производственным процессом на внешнее управляющее воздействие бесконечно большая даже при небольшом внешнем воздействии. Это

состояние соответствует состоянию с высокой энтропией и соответствует разрушению ИИУС согласно второму закону термодинамики. Энергия только выделяется и рассеивается. Отдельно рассмотрим подсистему пружин в этом состоянии. При $l_B \rightarrow 0$ длина пружины статичности также стремится к 0, следовательно перемещение точки опоры в сторону точки А, увеличения статичности системы, невозможно, а значит система не способна к накоплению энергии.

$$\lim_{l_A \rightarrow 0} F_B = \lim_{l_A \rightarrow 0} \frac{F_A l_A}{l_B} = 0 \quad (3.4)$$

При $l_A \rightarrow 0$, т.е. стремлении реактивности к 0, у ИИУС производственным процессом высокая статичность. Согласно (3.4) при любом внешнем управляющем воздействии реакция ИИУС отсутствует. Это соответствует состоянию неустойчивого равновесия ИИУС производственным процессом. Когда $l_A \rightarrow 0$ длина пружины реактивности также стремится к 0, следовательно такая ИИУС не реагирует на внешнее управляющее воздействие и не накапливает энергию.

3.2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОД ВНЕШНИМ УПРАВЛЯЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Рассмотрим начальное равновесное состояние ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники. При этом у пружин реактивности и статичности ИИУС отсутствуют растяжение и сжатие, их длина равна l_{A0} и l_{B0} соответственно. При перемещении точки опоры в сторону точки А на Δl в ИИУС производственным процессом накапливается энергия $E_A = k\Delta l^2$, аналогично выделяется $E_B = k\Delta l^2$. При $\Delta l \rightarrow l_A$ и $\Delta l \rightarrow l_B$ значение накапливаемой и выделяемой энергии будут максимальны.

$$E_{Amax} = kl_A^2; E_{Bmax} = kl_B^2 \quad (3.5)$$

При внешнем управляющем воздействии в течение времени t ИИУС

производственным процессом выведен из состояния равновесия. Точка А перемещается по круговой траектории на дугу s , а рычаг повернется на угол α (рис.3.3).

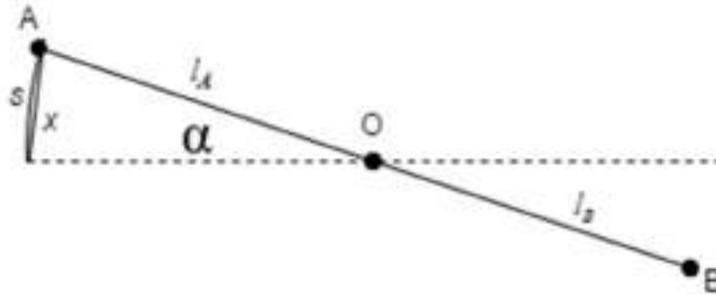


Рис.3.3. Поворот рычага и перемещение точки А

При этом совершается работа по перемещению конца рычага dA . Поскольку сила \vec{F}_A и вектор перемещения $d\vec{s}$ направлены в одну сторону $\vec{F}_A \parallel d\vec{s}$ элементарная путевая работа рассчитывается по формуле

$$dA = F_A ds; dA = F_A l_A d\alpha; A = \int_0^\alpha F_A l_A d\alpha = F_A l_A \alpha \quad (3.5)$$

Если тело массой m движется под действием силы \vec{F}_C по круговой траектории, то кроме путевой работы еще совершается работа центростремительной силы.

$$F_C = ma_c = \frac{mv^2}{l_A}; v = \frac{ds}{dt}; ds = l_A d\alpha; v = \frac{l_A d\alpha}{dt}; v = l_A \omega = l_A \varepsilon t, \quad (3.6)$$

где ε – угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{F_A}{ml_A}; \text{ время } t^2 = \frac{2\alpha}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

Тогда центростремительная сила

$$F_C = \frac{m(l_A \varepsilon t)^2}{l_A} = 2ml_A \varepsilon \alpha = 2\alpha F_A \quad (3.8)$$

Элементарная работа центростремительной силы равна

$$dA_C = 2F_A l_A \alpha \sin \alpha d\alpha \quad (3.9)$$

$$A_C = \int_0^\alpha 2F_A l_A \alpha \sin \alpha d\alpha = 2F_A l_A (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \quad (3.10)$$

Поскольку силы F_A и F_C взаимно перпендикулярны, то работы этих двух

сил аддитивны, т.е. складываются арифметически.

$$A_A = A + A_C; A_A = F_A l_A \alpha + 2F_A l_A (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \quad (3.11)$$

Для возвращения маятника в состояние равновесия необходимо совершить равную работу по перемещению точки В.

$$A_B = F_B l_B \alpha + 2F_B l_B (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \quad (3.12)$$

Возвращение к состоянию равновесия начинается после того, как прекращается внешнее управляющее воздействие. Определим точку невозврата, при достижении которой ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники уже не сможет вернуться в состояние равновесия. Точка, в которой стационарная работа ИИУС производственным процессом будет прекращена, т.е. возникнет состояние неустойчивого равновесия, статичности ИИУС или ее разрушение.

Пока на ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники оказывается внешнее управляющее воздействие и происходит работа по изменению внутреннего состояния ИИУС, в системе накапливается энергия, необходимая для возвращения в исходное состояние равновесия. Формируется ответная реакция. Значение энергии, необходимое для возвращения в состояние равновесия равно работе по перемещению точки опоры О. Это следует из принципа равновесия рычага (3.1). Для перемещения точки опоры О на расстояние Δl необходимо совершить работу A_O . Точка опоры О перемещается в сторону точки А, т.е. в сторону уменьшения реактивности и увеличения статичности ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники.

$$A_O = A_B = A_A \quad (3.13)$$

В представленной модели точка опоры О соединена с системой пружин, следовательно, при ее перемещении производится работа по сжатию одной пружины и растяжению другой.

$$A_O = k\Delta l^2 \quad (3.14)$$

В соответствии с (3.4) при $\Delta l \rightarrow l_A$ ИИУС не сможет вернуться в состояние равновесия; она перестанет реагировать на внешнее управляющее воздействие, инициируется состояние неустойчивого равновесия или статичности

системы. Максимальная работа в соответствии с (3.11) и (3.14), которая совершается по перемещению точки опоры O равна

$$A_{max} = kl_A^2 = F_A l_A \alpha + 2F_A l_A (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \quad (3.15)$$

$$l_A = \frac{F_A(\alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha))}{k} \quad (3.16)$$

Как видно из (3.16) реактивность ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники динамическая величина, зависит от величины внешнего управляющего воздействия, степени изменения состояния ИИУС и коэффициента k , отражающего жесткость или ригидность ИИУС. В процессе действия внешнего управляющего воздействия динамика реактивности l_A соответствует динамике функции $f(\alpha) = \alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)$. Рассмотрим график этой функции подробнее (рис.3.4).

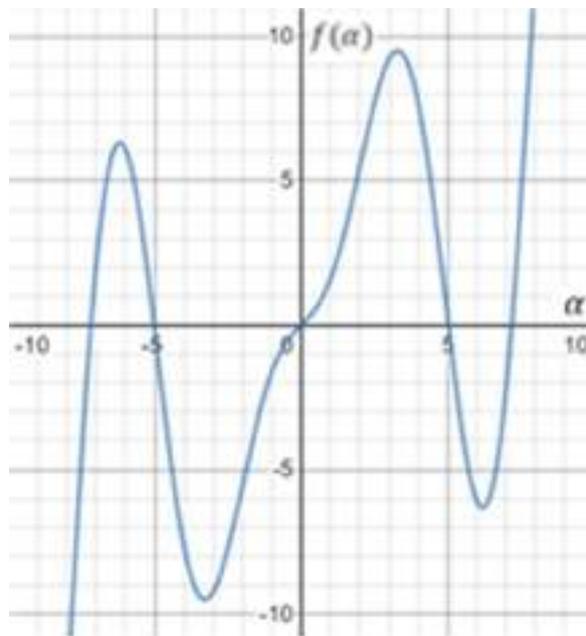


Рис.3.4. График динамики реактивности ИИУС

В процессе действия внешнего управляющего взаимодействия в начале реактивность ИИУС производственным процессом возрастает, достигнув максимума, затем убывает и в точке $\alpha = 5$ рад примет значение 0. Это точка начала неустойчивого равновесия ИИУС производственным процессом для

микро- и наноэлектроники. Далее система переходит в состояние неустойчивого равновесия. В точке $\alpha \sim 7$ град неустойчивое равновесие достигает своего максимального состояния, а реактивность ИИУС производственным процессом будет бесконечно возрастать, т.е. ИИУС стремится к состоянию с высокой энтропией в соответствии со вторым законом термодинамики.

Таким образом, разработанная математическая модель изменения состояния ИИУС при внешнем управляющем воздействии позволяет математически описать граничные состояния, условия их наступления и динамику изменения состояния ИИУС производственного процесса, что в свою очередь, позволит получить вероятностное пространство состояний, необходимое для прогнозирования поведения ИИУС.

3.3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В соответствии с ранее полученными результатами состояние компонента ИИУС производственным процессом определяется совокупностью упорядоченных пар (a_{ij}^E, v_{ij}^E) характеристики и ее значения. Упорядоченная пара (a_{ij}^E, v_{ij}^E) формируется в результате выполнения одной из функций O_i^E компонента N_i^E , выходным параметром которой является характеристика a_{ij}^E . Значение характеристики равно одному из определенных в модели компонента ИИУС. Переход от одного состояния ИИУС к другому соответствует последовательному выполнению функций компонента, определенному в иерархическом представлении ИИУС и называется поведением [172, 173]. Внешнее управляющее воздействие может изменить установленный порядок, что вызовет потерю устойчивости компонента ИИУС и ее переход в хаотическое состояние. Внутренние процессы классифицируются на разовые, повторяющиеся и циклические (периодические). Разовые процессы происходят один раз на

протяжении всего жизненного цикла ИИУС, повторяющиеся – несколько раз, циклические – повторяются с определенным периодом [174-176]. Одни и те же характеристики в повторяющихся и циклических процессах могут принимать разные значения (рис.3.5). Изменение характеристики в итерациях повторяющихся и циклических процессов в сторону улучшения говорит о развитии характеристики компонента ИИУС; ухудшение значения характеристики – о деградации; постоянное значение – о стабильности. Улучшение совокупности характеристик компонентов, используемых в ИИУС, говорит о развитии системы; ухудшение – о деградации; постоянство – о стабильности состояния ИИУС. При оптимизации и реорганизации процессов наборы характеристик могут меняться.

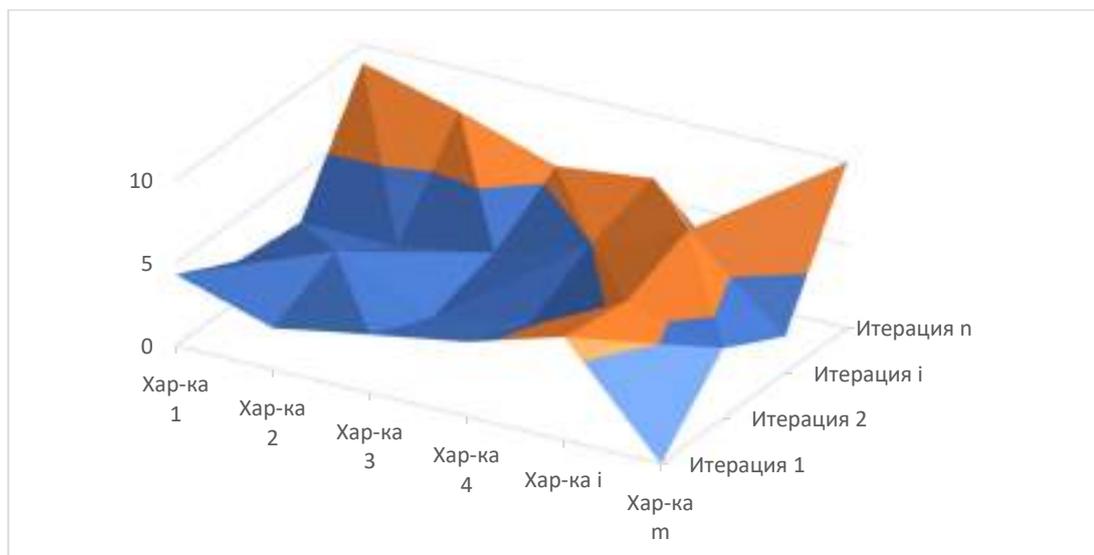


Рис.3.5. Изменение характеристик компонента ИИУС
в повторяющихся процессах

Характеристики компонента в каждой ИИУС и для каждого состояния делятся на обеспечивающие A_R^E , управляющие A_M^E , основные A_G^E и развивающие A_U^E . Состояние компонента оценивается по совокупности типов характеристик. В этом случае необходимо рассчитать среднее арифметическое значение для дискретных значений характеристик и среднее для непрерывной функции по теореме Лагранжа для значений характеристики, заданных числовым

интервалом.

$$\overline{N}_S^E = \langle \overline{A}_R^E, \overline{A}_M^E, \overline{A}_G^E, \overline{A}_U^E \rangle \quad (3.17)$$

Состояние ИИУС производственного процесса для микро- и нанoeлектроники определяется состоянием компонентов в него входящих, следовательно, изменение состояния хотя бы одного компонента говорит об изменении состояния ИИУС. Динамика среднего состояния \overline{N}_S^E компонента говорит о динамике состояния ИИУС производственным процессом.

Поведение компонента определяется переходом от одного состояния к другому $N_{iS}^E \rightarrow N_{(i+1)S}^E \rightarrow N_{(i+2)S}^E \rightarrow \dots$, следовательно, текущее состояние определяется функцией от предыдущего

$$N_{iS}^E = f(N_{(i-1)S}^E) \quad (3.18)$$

Переход от одного состояния к другому определяется отношением затрачиваемой энергии к управляющему воздействию. С учетом разделения характеристик объекта на обеспечивающие A_R^E , управляющие A_M^E , основные A_G^E и развивающие A_U^E получим:

$$N_{iS}^E = A_{(i-1)G}^E + A_{(i-1)U}^E + \frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \quad (3.19)$$

Прогноз изменения состояния ИИУС производственным процессом заключается в определении изменения состояния компонентов системы с учетом отношений между ними. В результате исследования получено вероятностное пространство состояний ИИУС производственным процессом (рис.3.6).

При $A_{(i-1)R}^E = 0$ состояние компонента не изменится, компонент останется статичным, находящимся в состоянии неустойчивого равновесия или стремящемся к разрушению при любом управляющем воздействии, что соответствует (3.4) в рассмотренной ранее модели состояния ИИУС.

При $A_{(i-1)R}^E > 0$ компонент обладает положительными обеспечивающими характеристиками, внешнее управляющее воздействие выполняется, поведение компонента ИИУС направлено в сторону точки неустойчивого равновесия с высоким уровнем энтропии.

При $A_{(i-1)R}^E < 0$ компонент ИИУС производственным процессом обладает диссипативным состоянием и характеристики компонента снижаются, поведение компонента направлено в сторону точки неустойчивого равновесия с более низким уровнем энтропии.

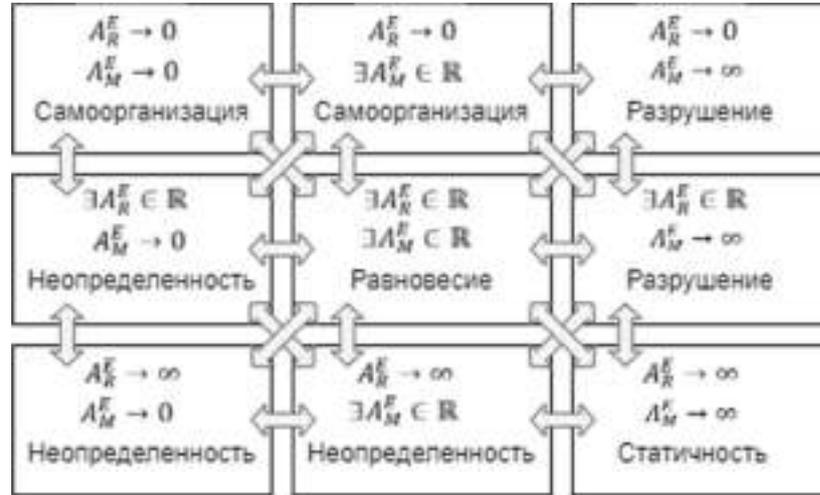


Рис.3.6. Вероятностное пространство состояний ИИУС

При $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} > 1$ внешнее управляющее воздействие выполнено с остатком обеспечивающих характеристик, что улучшит развивающие характеристики. При таком отношении обеспечивающих и управляющих характеристик возможно усиление внешнего управляющего воздействия.

При $0 < \frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} < 1$ управляющее воздействие выполняется с ухудшением развивающих характеристик, если $0 < \frac{A_{(i-1)R}^E + A_{(i-1)U}^E}{A_{(i-1)M}^E} < 1$, то с ухудшением основных характеристик.

При $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} = 1$ внешнее управляющее воздействие выполняется без остатка обеспечивающих характеристик и без изменения развивающих характеристик. Такое состояние соответствует состояниям, определенным в иерархической структуре ИИУС производственным процессом для микро- и нано-электроники.

При $A_{(i-1)R}^E \rightarrow \infty$ состояние компонента ИИУС производственным процессом не определено, возможно неустойчивое динамическое состояние, бифуркация.

При $A_{(i-1)M}^E \rightarrow \infty$ состояние компонента ИИУС стремится к статичному, что доказывает сделанный ранее вывод о том, что чрезмерные условия и ограничения ИИУС производственным процессом, которые формируют управляющее воздействие, ведут к статичному состоянию.

При $A_{(i-1)M}^E \rightarrow 0$ состояние компонента ИИУС не определено, возможно неустойчивое динамическое состояние, бифуркация.

Как следует из (3.16), реактивность ИИУС или компонента – это способность ИИУС или компонента отреагировать на внешнее управляющее воздействие и перейти в другое состояние $l_A = \frac{F_A(\alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha))}{k}$. Из уравнения

(3.19) способность перейти в другое состояние определяется слагаемым $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E}$.

Следовательно,

$$\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} = \frac{F_A(\alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha))}{k} \quad (3.20)$$

Ригидность ИИУС производственным процессом определяется совокупностью управляющих характеристик. Обеспечивающие характеристики компенсируют внешнее управляющее воздействие. Как следует из абстрактной модели компонента, внешнее управляющее воздействие – это функция, которая изменяет характеристики компонента ИИУС, на которые направлено воздействие. В качестве входных параметров используются текущие характеристики компонента и связи между ними.

$$F_A(\alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)) = O_{i-1}^E(A_{(i-1)R}^E, A_{(i-1)M}^E, A_{(i-1)G}^E, A_{(i-1)U}^E, R^E) \quad (64)$$

При $F_A(\alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)) \rightarrow 0$

$O_{i-1}^E(A_{(i-1)R}^E, A_{(i-1)M}^E, A_{(i-1)G}^E, A_{(i-1)U}^E, R^E) \rightarrow$

$O_i^E(-A_{(i-1)R}^E, A_{(i)M}^E, max, 0, R^E)$, т.е. основные характеристики достигнут максимально определенных значений при заданных ограничениях, развивающие характеристики достигнут 0, обеспечивающие характеристики изменят знак на противоположный (накапливающие ресурсы объекты станут диссипативными и наоборот). Как видно из графика (см. рис.3.4) при дальнейшем внешнем управляющем воздействии на ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники начнется диссипация обеспечивающих характеристик и разрушение связей между ними для компенсации диссипации, что приведет к разрушению системы согласно второму закону термодинамики $R^E \rightarrow \emptyset$. И, наоборот, при накоплении энергии создаются новые связи между обеспечивающими характеристиками $R^E \rightarrow max$. В процессе диссипации связи разрушаются в последовательности: отношения реализации переходят в отношения ассоциации, затем агрегации и композиции, отношения обобщения переходят в отношения зависимости, которые затем разрушаются. В процессе накопления энергии отношения формируются: отношения зависимости переходят в отношения обобщения, отношения ассоциации - в отношения реализации.

Нелинейность ИИУС производственным процессом затрудняет прогнозирование ее состояния, поскольку создает различные неопределенности. Неопределенность оказывает негативное влияние на прогнозирование состояния и поведения ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники. Наиболее популярным и традиционным методом прогнозирования поведения с учетом различных нелинейных факторов, в том числе и случайных процессов, является метод Монте-Карло, позволяющий делать множество выборочных симуляций и выводить из них решение на основе некоторой математической модели [176-180]. Метод Монте-Карло имеет ряд существенных недостатков, особенно значимых при его использовании для ИИУС производственными процессами. Наиболее точные результаты использования метода

получаются при задании диапазона, в котором содержится конечный результат. При этом выборочные симуляции должны быть равномерно распределены по всей системе, что не всегда возможно. Результат для ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники, как правило, получается с высокой погрешностью, размер которой требуется оценивать отдельно. При реализации метода Монте-Карло в виде вычислительного алгоритма возникает проблема общей детерминированности компьютера. Для ее решения предлагается использовать алгоритмы генерации псевдослучайных чисел, т.е. детерминированную последовательность команд. Таким образом, детерминированность компьютеров и других вычислительных устройств проблема каноническая. Такая детерминированность снижает точность прогноза изменения состояния и поведения ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

В настоящей диссертационной работе предлагается подход к управлению и прогнозированию состояния и поведения ИИУС производственным процессом, который заключается в определении изменения состояния и поведения компонентов ИИУС с учетом отношений между ними. Прогнозирование поведения компонентов заключается в определении отношения обобщающих характеристик к управляющим с учетом связей между ними.

Управление и прогноз состояния компонента включает следующие операции.

1) Выделение обеспечивающих A_R^E , управляющих A_M^E , основных A_G^E и развивающих A_U^E характеристик компонента ИИУС производственным процессом для каждого состояния.

2) Определение отношения $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E}$ с учетом связей между характеристиками. Значение отношения позволит определить значения основных характеристик A_G^E и развивающих A_U^E . Значения характеристик определены в модели компонента ИИУС, в случае неопределенного значения возникнет неустойчивое состояние.

При $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} > 1$ неиспользованные обеспечивающие характеристики перейдут в развивающие.

При $0 < \left| \frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \right| < 1$ и при $0 < \left| \frac{A_{(i-1)R}^E + A_{(i-1)U}^E}{A_{(i-1)M}^E} \right| < 1$ компоненту ИИУС производственным процессом не хватает значений обеспечивающих характеристик для выполнения управляющего воздействия. В этом случае необходимо перераспределить обеспечивающие характеристики компонента, выделить отношения зависимости и агрегации между ними, перевести отношения в обобщающие и ассоциативные соответственно. Возможно создание обобщающих отношений с другим компонентом ИИУС с целью увеличения значений обеспечивающих характеристик.

При $A_{(i-1)R}^E \rightarrow \infty$ необходимо создание отношений реализации между обеспечивающими и развивающими характеристиками компонента с целью перераспределения значений обеспечивающих характеристик. Возможно создание отношений реализации с другими компонентами.

При $A_{(i-1)M}^E \rightarrow 0$ необходимо создание отношений зависимости, агрегации и композиции между управляющими характеристиками и обеспечивающими с целью формирования значений для управляющих характеристик. Возможно создание отношений зависимости, агрегации или композиции с другими компонентами ИИУС производственным процессом. После формирования управляющих характеристик необходимо перевести отношения в обобщающие и ассоциативные соответственно.

Таким образом, значение отношения $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} = 1$ определяет, что поведение компонента соответствует последовательности операций иерархического представления ИИУС. При $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} > 1$ переход в новое состояние ИИУС сопровождается развитием компонента, возможен переход в новое состояние ИИУС с усилением внешнего управляющего воздействия. При $0 < \left| \frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \right| <$

1 и при $0 < \left| \frac{A_{(i-1)R}^E + A_{(i-1)U}^E}{A_{(i-1)M}^E} \right| < 1$ переход в новое состояние ИИУС завершается с деградацией компонента или компонент примет статичное состояние до другого этапа работы ИИУС производственным процессом.

При наличии обратной связи между состояниями компонента возможна корректировка внешнего управляющего воздействия.

Для решения задачи управляемого перевода состояния компонента ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники в состояние с требуемыми характеристиками необходимо создать такое управляющее воздействие при котором $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \geq 1$.

Переход в новое состояние ИИУС с развитием компонента, т.е. увеличением значений характеристик A_{ij}^E , позволит перевести отношения с компонентами в другие с образованием новых состояний компонента, что приведет к развитию ИИУС производственным процессом.

Аналогично, прогнозирование и управление состоянием ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники состоит в разделении компонентов на обеспечивающих, управляющих, основных и развивающих и оценке их усредненных значений.

$$P_{iS}^S = \overline{N_{(i-1)G}^E} + \overline{N_{(i-1)U}^E} + \frac{\overline{N_{(i-1)R}^E}}{\overline{N_{(i-1)M}^E}} \quad (3.21)$$

Для формирования поведения компонента необходимо построить иерархическую структуру ИИУС производственным процессом по разработанным в данной работе принципам и методики декомпозиции ИИУС. Каждый элемент иерархической структуры представляет состояние компонента. Участие компонента в ИИУС определяется его ролью, т.е. набором характеристик, операций и отношений, требуемых для данного ИИУС производственным процессом.

$$N_R^E = \langle A_{1R}^E, \dots, A_{nR}^E, V_{1R}^E, \dots, V_{nR}^E, O_{1R}^E, \dots, O_{mR}^E, R_{1R}^E, \dots, R_{kR}^E \rangle \quad (3.22)$$

В ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники

принимают участие и другие компоненты. Отношения между компонентами в процессе имеют тип: зависимые, обобщенные, ассоциативные, реализующие. В ИИУС определены функции над объектами.

Для достоверного прогнозирования и управления состоянием ИИУС производственным процессом необходимо накапливать данные обо всех итерациях повторяющихся и циклических процессах [181-183]. Динамика разового процесса определяется путем анализа динамики референтного процесса [184].

Для анализа мониторинга динамики ИИУС производственным процессом и прогнозирования ее состояния необходимо составить систему итерированных функций, учитывающей предыдущие итерации работы системы и значения характеристик компонентов в них. Результат применения итерированных функций называется аттрактором. Поведение компонента в повторяющихся и циклических процессах будет подобно, отличие заключается в значениях характеристик и величины внешнего воздействия. Таким образом, повторяющиеся циклические процессы являются аффинным преобразованием, т.е. линейным преобразованием со сдвигом. Для построения системы итерированных функций необходимо определить коэффициенты аффинных преобразований.

Пусть $N_{Si}^E = \langle A_{Ri}^E, A_{Mi}^E, A_{Gi}^E, A_{Ui}^E \rangle$ состояние ИИУС в i -ой итерации процесса, тогда аффинное преобразование T имеет вид:

$$T_i \begin{pmatrix} A_{Ri}^E \\ A_{Mi}^E \\ A_{Gi}^E \\ A_{Ui}^E \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{R1} & \alpha_{R2} & \alpha_{R3} & \alpha_{R4} \\ \alpha_{M1} & \alpha_{M2} & \alpha_{M3} & \alpha_{M4} \\ \alpha_{G1} & \alpha_{G2} & \alpha_{G3} & \alpha_{G4} \\ \alpha_{U1} & \alpha_{U2} & \alpha_{U3} & \alpha_{U4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{Ri}^E \\ A_{Mi}^E \\ A_{Gi}^E \\ A_{Ui}^E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{Ri} \\ \gamma_{Mi} \\ \gamma_{Gi} \\ \gamma_{Ui} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Для построения системы итерированных функций введем в рассмотрение совокупность сжимающих отображений

$$T_1, \text{ с коэффициентом сжатия } s_1 < 1,$$

$$T_2, \text{ с коэффициентом сжатия } s_2 < 1$$

⋮

T_m , с коэффициентом сжатия $s_m < 1$

Эти m отображений используются для построения одного сжимающего T изображения в пространстве K всех состояний объекта. Преобразование Хатчинсона $T: K \rightarrow K$ определяется следующим образом:

$$T(N_S^E) = T_1(N_S^E) \cup T_2(N_S^E) \cup \dots \cup T_m(N_S^E), \quad N_S^E \in K \quad (3.24)$$

Это преобразование ставит в соответствие преобразование состояния N_S^E из K в состояние из K .

Определим итерационную схему:

$$\begin{aligned} N_{S0}^E &= \langle A_R^E, A_M^E, A_G^E, A_U^E \rangle \\ N_{S1}^E &= T(N_{S0}^E), \\ N_{S2}^E &= T(N_{S1}^E), \\ &\vdots \\ N_{Sn}^E &= T(N_{S(n-1)}^E), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.25)$$

Для решения задачи прогнозирования состояния ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники необходимо определить когда заданная система итерированных функций порождает предельное множество N_S^E .

$$N_S^E = \lim_{n \rightarrow \infty} N_{Sn}^E \quad (3.26)$$

В смысле сходимости в метрике Хаусдорфа. Если предел существует, то N_S^E является аттрактором системы итерированных функций. Для обеспечения сходимости A_R^E и A_M^E должны быть определены в каждой итерации ИИУС. Тогда

$$N_S^E = \lim_{n \rightarrow \infty} N_{Sn}^E = \langle A_R^E, A_M^E, A_G^E \rightarrow \max, A_U^E \rightarrow \max \rangle \quad (3.27)$$

Состояние ИИУС производственным процессом будет стремиться к максимальному значению основных и развивающих характеристик, что обеспечит развитие объекта с возможностью образования новых состояний (рис.3.7).

Известно, точность прогноза есть понятие прямо противоположное понятию ошибка прогнозирования. Если ошибка прогнозирования мала, то вели-

чина точности прогноза велика, и наоборот, при большой ошибке прогнозирования точность прогноза мала. При оценке точности прогноза всегда определяется значение ошибки прогноза. Существует несколько способов вычисления ошибки [158, 167, 185, 186].

При использовании для управления ИИУС производственным процессом, в состав которой входят различные контрольно-измерительные приборы, ошибка прогнозирования и, следовательно, точность прогноза зависят от погрешности измерений параметров процесса [187].

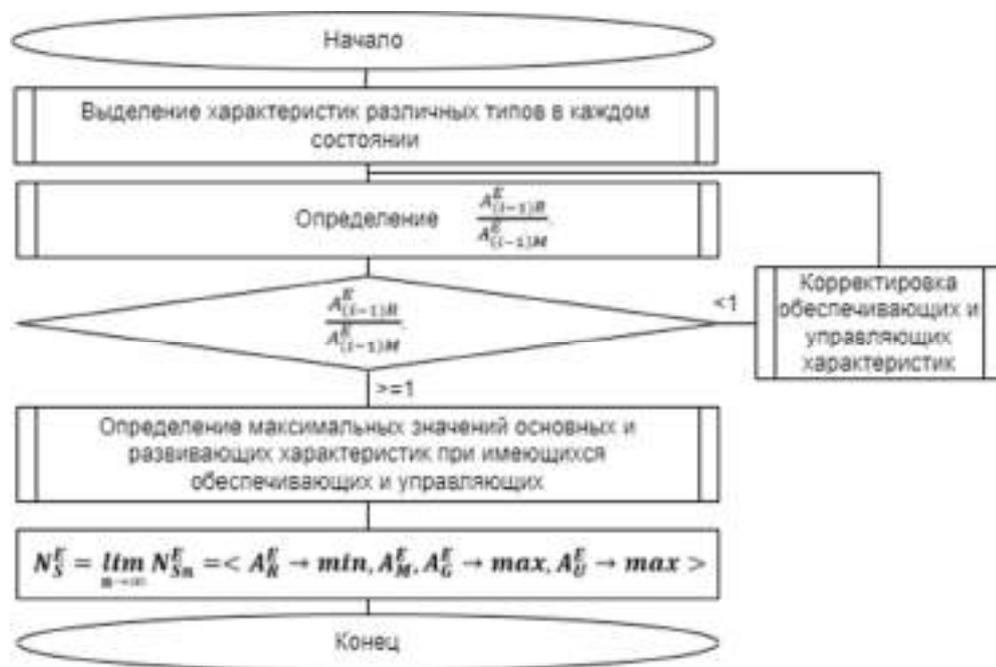


Рис.3.7. Схема алгоритма прогнозирования состояния ИИУС

Известно, что погрешность измерений обусловлена несовершенством средств и методов измерений, воздействием внешних факторов и другими причинами. Следовательно, при обработке данных, поступающих с контрольно-измерительных приборов, кроме определения параметров ИИУС производственным процессом следует учитывать интервал, в котором находится значение измеряемой величины и сравнивать его с допустимыми нормами. Величина погрешности измерения – суммарная величина, обусловленная рядом факторов, влияющих на результат измерений. При вычислении погрешности

следует классифицировать составляющие суммарной погрешности, выявить закономерности и причины появления этих составляющих с целью нахождения способа уменьшения влияния погрешности на результат измерения. В зависимости от закономерности проявления принято выделять систематические, случайные и грубые погрешности.

Случайная погрешность изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайная погрешность относится к некорректируемым погрешностям, поскольку ее невозможно предсказать. Случайную погрешность нельзя устранить. Однако, возможно оценить ее значение и найти способ ее уменьшения. Для оценки значения случайной погрешности измерений используются методы математической обработки данных всех итераций измерений на основе теории вероятности.

Систематической называется такая погрешность измерений, которая остается постоянной или закономерно изменяющейся при повторных измерениях одной и той же величины. К причинам появления систематических погрешностей относятся несовершенство методов, средств и объектов измерения. Систематические погрешности делятся на 4 группы:

- погрешности, причина которых известна и значение которых определяется с достаточной точностью. Такая погрешность устраняется за счет введения поправок, величина которых зависит от значений других ошибок.

- погрешности, причина возникновения которых известна, но значение которых не может быть определено с достаточной точностью. К таким погрешностям относится погрешность измерительных приборов. Ошибки такого типа не исключаются, однако, их наибольшее значение устанавливается и учитывается при определении суммарной погрешности.

- погрешности неизвестной природы происхождения, но величина которых значительна. Такие погрешности, как правило, проявляются при сложных измерениях, при которых значение, считающееся определенным с высокой точностью, содержит значительную погрешность. Для исключения подобного

вида погрешностей измерения следует проводить измерения другими методами в других условиях.

- погрешности, обусловленные свойствами объекта измерений. В частности, при измерении цилиндра, сечение которого отлично от формы круга, возникнут погрешности данного типа.

При отсутствии в процессе измерений систематических ошибок случайные ошибки служат причиной разброса результатов измерений относительно истинного значения измеряемого параметра ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники. Наличие систематической погрешности при измерении параметров производственного процесса приводит к тому, что результаты измерений разбросаны относительно смещенного значения измеряемого параметра. Следовательно, случайные погрешности определяют достоверность полученного результата, а систематические погрешности устойчиво искажают результат измерения. Традиционно выделяют следующие способы исключения или учета систематических погрешностей:

- устранение источников погрешности до начала измерения параметров ИИУС производственным процессом;

- исключение погрешностей в процессе измерения производственных параметров;

- внесение поправок в результаты измерения параметров ИИУС производственным процессом.

Грубые погрешности существенно превышают по своему значению оправдываемые объективными условиями измерений систематические и случайные погрешности. Основными причинами таких погрешностей является неправильное считывание показаний контрольно-измерительных приборов; их неисправности; внешнее воздействие. Наличие грубой погрешности выявляется при обработке результатов измерений. При этом они отбрасываются из рассмотрения за счет отбрасывания результатов измерений, в которых обнаружены грубые погрешности.

Ошибка прогнозирования показывает насколько прогнозируемое значение состояния отклонилось от фактического значения. Ошибка используется для расчета точности прогнозирования, что позволяет оценить корректность метода прогнозирования. Алгоритм расчета ошибки прогнозирования имеет общую основу – сначала находится ошибка прогнозирования по одной позиции, а затем рассчитывается общая. Среди ошибок прогнозирования различают следующие:

- средняя процентная ошибка прогнозирования;
- средняя абсолютная процентная ошибка прогнозирования;
- взвешенная абсолютная процентная ошибка прогнозирования;
- среднеквадратичная ошибка прогнозирования;
- средняя абсолютная масштабированная ошибка прогнозирования.

Приведенные ошибки прогнозирования наиболее часто используются для расчета точности прогнозов при автоматизации. Каждая из ошибок имеет свои преимущества и недостатки. В приведенных ниже формулах величина F обозначает фактическое значение, P – прогнозируемое, а σ – значение ошибки.

Средняя процентная ошибка прогнозирования. Основным недостатком данной ошибки является то, что в нестабильном числовом ряду с большими и частыми выбросами любое незначительное колебание фактического значения и прогнозируемого значительно меняет показатель ошибки и, как следствие, точность прогноза. Кроме этого, данный тип ошибки является несимметричным, поскольку отклонения в положительную и отрицательную сторону от фактического значения по-разному влияют на показатель ошибки. Данный тип ошибки не подходит для оценки точности прогноза для разработанной в настоящей диссертационной работе алгоритма анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС производственным процессом из-за своей несимметричности.

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_i - P_i}{F_i} \quad (3.28)$$

Средняя абсолютная процентная ошибка прогнозирования. Данный тип

ошибок имеет аналогичные предыдущему типу недостатки – несимметричность и нестабильность. Следовательно, не может быть использован для оценки точности разработанного алгоритма анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники.

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{F_i - P_i}{F_i} \right| \quad (3.29)$$

Взвешенная абсолютная процентная ошибка прогнозирования. Данный тип ошибок является симметричный и наименее чувствительным к искажениям числовых рядов. Взвешенная абсолютная процентная ошибка прогнозирования может быть использована при оценке точности алгоритма анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС производственным процессом.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |F_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (3.30)$$

Среднеквадратичная ошибка прогнозирования. В отличие от рассмотренных выше типов ошибок данная ошибка является симметричной. Однако, при расчете данной ошибки разница между фактическим и прогнозируемым значением возводится в квадрат, что приводит к чувствительности к выбросам числового ряда. Поскольку ИИУС практически не имеет выбросов числового ряда, состоящего из значений характеристик автоматизированного процесса в каждом состоянии для каждой итерации, среднеквадратичная ошибка прогнозирования может быть использована для оценки точности прогноза изменения состояния ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - P_i)^2} \quad (3.31)$$

Средняя абсолютная масштабированная ошибка прогнозирования. Данный тип ошибки не зависит от нестабильности числового ряда и является симметричной. Недостатком средней абсолютной масштабированной ошибки прогнозирования, следствием которого стало низкая распространенность ошибки, является то, что данная ошибка не предназначена для расчета списка

значений состояний процесса в различных итерациях, в которых присутствует фактическое и прогнозируемое значение характеристик процесса. Средняя абсолютная масштабированная ошибка используется для расчета точности прогнозирования единственной позиции, основываясь на предыдущих показателях фактического и прогнозируемого значения, чем больше таких значений, тем более точно рассчитывается показатель точности. Средняя абсолютная масштабированная ошибка используется для оценки точности алгоритма анализа и прогнозирования состояния ИИУС в редких, единичных случаях.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |F_i - P_i|}{\frac{n}{n-1} \sum_{i=2}^n |F_i - F_{i-1}|} \quad (3.32)$$

Оценка точность прогноза состояния ИИУС производственным процессом заключается в определении среднеквадратичных отклонений значений характеристик объектов от ожидаемых $\sigma = \sqrt{\frac{\Delta A_R^{E2} + \Delta A_M^{E2} + \Delta A_G^{E2} + \Delta A_U^{E2}}{n}}$ для каждого состояния (рис.3.8).

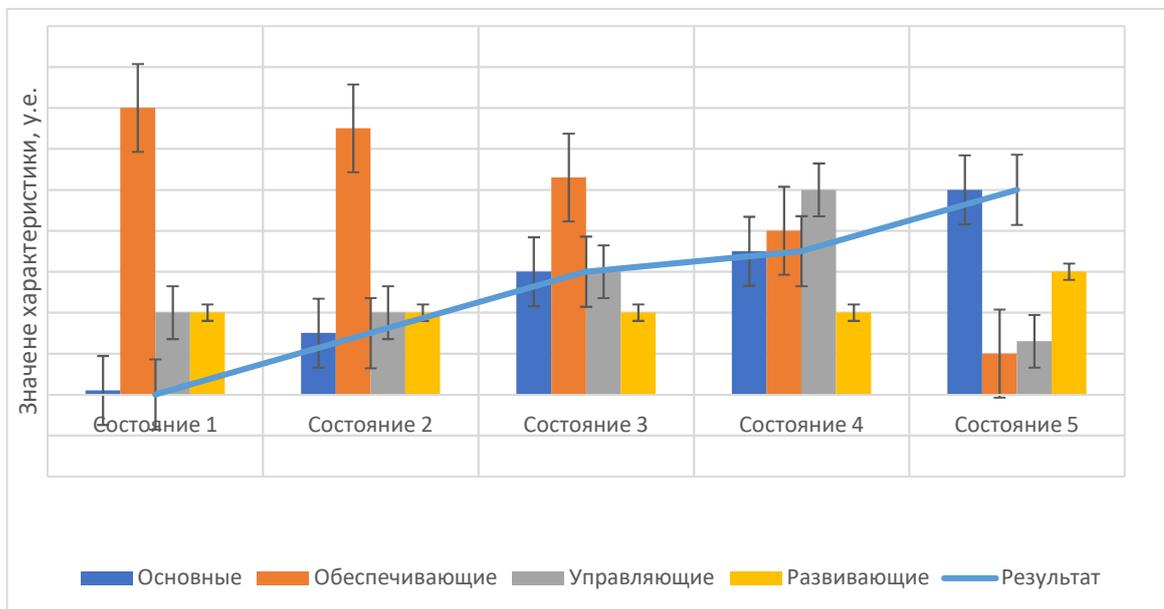


Рис.3.8. Отклонение характеристик ИИУС от ожидаемых

Таким образом, прогнозирование состояния ИИУС производственным

процессом для микро- и наноэлектроники для принятия решения, формирования и корректировки управляющего и контролирующего воздействия сводится к определению максимальных значений основных и развивающих характеристик при имеющихся обеспечивающих и управляющих с учетом нелинейных факторов.

3.4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ВНУТРЕННИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЦЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Под термином «решение» здесь принимается совокупность состояний компонентов, в которые они могут перейти в процессе работы ИИУС производственным процессом. Принятие решения заключается в обоснованном выборе одного состояния компонента из выделенной совокупности. Ситуации связанные с принятием решения содержат множество неопределенных факторов, которые оказывают существенное влияние на решаемую задачу [188-191].

В задачах, связанных с принятием решения в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, возникает необходимость выбора одного или нескольких альтернативных вариантов решений (состояний компонентов ИИУС). Как правило, необходимость такого выбора вызвана проблемной ситуацией, обусловленной совокупностью различных нелинейных факторов. И выбор состоит из желаемого состояния ИИУС и действительного. Таким образом, задача принятия решения сводится к выбору между несколькими альтернативными вариантами, при котором каждый вариант приводит к результату, который называется исход. Каждый альтернативный вариант имеет свои преимущества и недостатки, которые оказывают различное влияние на исход. Учитывая конечные цели и задачи ИИУС формируется система предпочтений, которая позволяет учитывать достоинства и недостатки альтернатив и осуществлять выбор.

Ситуации в ИИУС производственным процессом, в которых следует

принимать решение, делятся на определенные и неопределенные. Принятие решений в условиях определенности является известной задачей и не представляет интереса. Поскольку каждой альтернативе в данном случае соответствует определенный исход, существует целевая функция f , определенная на множестве альтернатив. Нахождение решения заключается в нахождении экстремума этой функции.

При управлении состоянием ИИУС довольно часто возникают неопределенные ситуации, тем самым актуализируя понятие неопределенности в современной деятельности любого предприятия. На управление производственным процессом влияют параметры внешней и внутренней среды, изменение которых сложно предсказать с достаточной точностью. Особое влияние имеет человеческий фактор с учетом сложившейся общемировой ситуации [192, 193]. Другими словами, неопределенность в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники предполагает наличие нескольких исходов для каждой альтернативы.

Неопределенность внешней среды для информационно-измерительной и управляющей системы производственными процессами для микро- и наноэлектроники подразумевает отсутствие полной и достоверной информации о состоянии и параметрах окружающей среды, влияющей на производственные процессы и результаты управления. Данная неопределенность имеет вероятностный характер и обусловлена следующими факторами.

- *Изменчивость внешних условий.* Внешние условия, такие как температура, влажность, давление и т.д., могут меняться со временем и приводить к изменениям в производственных процессах. В частности, изменение температуры может повлиять на скорость химической реакции или на электрические свойства материалов.

- *Неопределенность поставок и сырья.* Данная неопределенность возникает из-за нестабильности поставок сырья или компонентов, необходимых для производства. В частности, задержки в поставках или изменения в качестве сырья приводят к изменению производственных процессов и требований к

управлению.

- Изменение требований к качеству и составу готовых изделий. Требования к готовым изделиям меняются со временем, что, в свою очередь, требует изменений в производственных процессах и стратегиях управления. В частности, изменение спроса на определенные изделия требует изменения объема производства или качества продукта.

- Технологические изменения. Развитие технологий и новые открытия приводят к изменениям в производственных процессах и требованиях к управлению. В частности, внедрение новых материалов или процессов производства может потребовать изменений в управлении и контроле.

- Экономическая неопределенность. Экономические факторы, такие как изменение цен на рынке или финансовые условия создают дополнительную неопределенность в производственных процессах и требованиях к управлению. В частности, изменение стоимости сырья или энергии может потребовать изменения стратегий управления для оптимизации затрат.

Принятие решений в условиях неопределенности требует гибкости и способности адаптироваться к изменяющимся условиям. Важно использовать методы анализа и прогнозирования, а также методы принятия решений на основе экспертных знаний для оценки возможных сценариев и выбора оптимальных решений. Комбинация различных методов и подходов позволяет управляющей системе принимать решения в условиях неопределенности и достигать желаемых результатов.

Неопределенность внутренних характеристик информационно-измерительной и управляющей системы производственными процессами для микро- и наноэлектроники оказывает значительное влияние на принятие решений за счет наличия следующих факторов:

- Точность измерений. Неопределенность измерений возникает из-за погрешностей в измерительных приборах, а также из-за внутренних шумов и возмущений в системе измерения. Данный факт приводит к неопределенности в получении данных о состоянии производственных процессов.

- Надежность оборудования. Неопределенность внутренних характеристик ИИУС производственными процессами на практике возникает из-за возможных отказов или сбоев в работе оборудования системы. В частности, датчики, контрольно-измерительное оборудование или исполнительные узлы и механизмы выходят из строя, что приводит как к потере данных, так и к получению неточной или недостоверной информации о состоянии системы.

- Динамика процессов. Неопределенность внутренних характеристик возникает из-за сложно предсказуемой динамики производственных процессов. Примером такой неопределенности является изменение параметров процессов, таких как скорость потока или температура.

- Неопределенность моделей. Использование математических моделей для описания производственных процессов также вносит неопределенность из-за ограничений моделирования, приближений и предположений. Указанный вид неопределенности приводит к ошибкам в прогнозировании и управлении процессами.

- Временные задержки. Неопределенность внутренних характеристик ИИУС обусловлена наличием временных задержек в получении информации о состоянии производственных процессов или в реакции управляющей системы на изменения.

Для управления производственными процессами в условиях неопределенности внутренних характеристик информационно-измерительной и управляющей системы необходимо использовать методы адаптивного управления, методы оценки и учета неопределенности, а также методы обеспечения надежности и резервирования оборудования. Кроме того, следует разрабатывать и использовать модели, учитывающие неопределенность и динамику процессов для принятия управленческих решений.

Неопределенность целей информационно-измерительной и управляющей системы производственными процессами для микро- и наноэлектроники оказывает значительное влияние на принятие решений. Цели реальных ИИУС

производственными процессами довольно часто формулируются неоднозначно или нечетко, что затрудняет их понимание и интерпретацию различными участниками процесса. Кроме того, цели производственных процессов в реальных условиях меняются со временем из-за изменения внешних условий, требований клиентов или стратегических целей компании. Подобные ситуации приводят к тому, что возникает неопределенность в том, какие цели следует достичь и какие действия принимать для их достижения.

Определение нескольких целей ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники порождает противоречие, поскольку достижение одной цели зачастую приводит к полному отрицанию другой. Разрешение данной неопределенности требует применения дополнительных мер по согласованию целей и выбору такого решения, которое позволяет достигнуть в определенной степени все обозначенные цели. Еще одной причиной неопределенности внутренних характеристик и целей ИИУС является нечеткость или изменчивости приоритетов целей в информационно-измерительной и управляющей системе. В частности, приоритеты могут меняться в зависимости от текущих обстоятельств или изменений внешних условий. Кроме того, дополнительные трудности в принятии решений создает нечеткость критериев оценки уровня достижения цели ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

Для управления неопределенностью целей информационно-измерительной и управляющей системы производственными процессами для микро- и наноэлектроники важно использовать методы анализа и определения целей, методы управления приоритетами и противоречиями, а также методы оценки результатов и адаптации целей к изменяющимся условиям [194-196]. Также важно обеспечить прозрачность и понятность формулирования целей для минимизации неоднозначности и исключения конфликтов в их интерпретации.

Принятие решений при управлении производственными процессами в микро- и наноэлектронике в условиях неопределенности является сложной задачей, требующей применения различных методов и подходов. В настоящее

время широко применяются следующие подходы:

- Методы статистического анализа позволяют анализировать и предсказывать вероятности различных событий и их влияние на производственные процессы. К достоинствам данных методов следует отнести оценку влияния одной или нескольких независимых переменных на зависимую переменную; построение прогностических моделей значений зависимой переменной на основе известных значений независимых переменных; выявление наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на процесс или явление; однозначная интерпретация результатов и высокая точность оценки полученных моделей. Однако, существенным недостатком статистических методов является отсутствие мультиколлинеарности и нормальность распределения остатков, а также первоначальное допущение о линейности связей между переменными. Большое количество независимых переменных существенно усложняет получаемые модели, что приводит к переобучению модели и высокой вероятности возникновения ошибок. Кроме того, наличие высокой корреляции между независимыми переменными существенно затрудняет интерпретацию результатов статистического анализа. Следовательно, методы статистического анализа не позволяют с требуемой точностью оценивать состояние ИИУС производственным процессом с учетом нелинейности с целью принятия управленческих решений в условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей системы.

- Методы оптимизации позволяют находить оптимальные решения в условиях ограничений и неопределенности. Один из наиболее распространенных методов оптимизации, линейное программирование, предполагает наличие точной информации о параметрах модели. Однако в реальных условиях часто возникает неопределенность, когда значения параметров неизвестны или могут изменяться. Для этого вместо одного набора значений параметров модель может быть рассмотрена с использованием нескольких сценариев, которые отражают различные возможные значения параметров. Для каждого сценария строится отдельная модель линейного программирования и затем

анализируются результаты для каждого сценария. Кроме того, возможно использование статистических методов для оценки вероятностей различных значений параметров, включаемых в модель линейного программирования в виде стохастических переменных или ограничений. Следует отметить, что возможно нахождение решения, которое минимизирует риск или учитывает вероятностное распределение параметров. Важно отметить, что применение методов линейного программирования в условиях неопределенности требует дополнительных данных и анализа, более сложных моделей и алгоритмов оптимизации. Также следует учитывать, что точность результатов будет зависеть от точности предоставленных данных о неопределенности. Генетические алгоритмы являются эволюционными методами оптимизации и используются для принятия решений в условиях неопределенности. Они основаны на принципах естественного отбора и генетики. Для применения генетического алгоритма следует первоначально закодировать возможные решения в форму генетического кода. Это может быть представлено в виде строк или последовательностей битов. Каждый генотип представляет одно возможное решение. Далее необходимо определить функцию приспособленности, которая оценивает качество каждого решения. Функция приспособленности учитывает неопределенность путем оценки вероятностей или степени уверенности в достоверности решения. Затем случайным образом создается начальная популяция решений с возможностью применения операторов генетической манипуляции, что помогает найти лучшее решение в условиях неопределенности. Для оценки полученных результатов используется функция приспособленности. Генетические алгоритмы являются эффективными инструментами для поиска решений в условиях неопределенности. Однако важно правильно настроить параметры алгоритма и выбрать подходящую функцию приспособленности для конкретной задачи.

- Методы принятия решений на основе экспертных знаний используются для принятия решений при отсутствии достаточного количества данных или при неопределенности. Примерами таких методов являются методы анализа

иерархий, методы фаззи-логики и др. Метод анализа иерархий позволяет структурировать сложные проблемы принятия решений и определять относительную важность различных критериев и альтернатив. Процесс анализа иерархий включает в себя следующие шаги: структурирование проблемы; формирование матрицы сравнений; расчет приоритетов на основе матрицы сравнений; проверка согласованности матриц сравнения; синтез общих приоритетов и альтернатив; выбор наилучшей альтернативы или определение наиболее важных критериев с учетом полученных приоритетов на всех уровнях иерархии.

- Машинное обучение позволяет обучать компьютерные модели на основе исторических данных и использовать их для прогнозирования и принятия решений в условиях неопределенности.

- Имитационное моделирование позволяет создавать компьютерные модели производственных процессов и проводить эксперименты с различными сценариями для оценки и выбора оптимальных решений. В частности, методы системной динамики, агентного моделирования и др.

- Адаптивное управление позволяет изменять стратегии и принимать решения на основе текущей информации и изменяющихся условий производства. В частности, методы адаптивного управления с обратной связью, методы адаптивной оптимизации и др.

Комбинация описанных выше методов и подходов используется для принятия решений при управлении производственными процессами в микро- и наноэлектронике в условиях неопределенности. Важно также учитывать специфику конкретной задачи и доступность данных для анализа. Все это усложняет процесс принятия решения и принятые решения достаточно часто не соответствуют ожидаемой эффективности. Причинами таких проблем в традиционных моделях принятия решений являются отсутствие учета зависимостей между различными факторами неопределенностей. Матрица решений и вероятность наступления того или иного события рассчитывается для каждого фак-

тора отдельно. В процессе диссертационного исследования состояний неопределенности ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники получено, что возникновение одного фактора является порождающей ситуацией для возникновения фактора другого типа неопределенности. Все это делает оценку вероятности наступления событий в следствие принятия решения недостаточно точной, с высокой погрешность. Второй причиной низкой эффективности принимаемых решений в условиях неопределенности является способ формирования матрицы решений на основе анализа изменения состояния в случае принятия решения окружающей среды и других объектов. При этом изменение состояния того объекта, относительно которого принимаются решения не учитывается.

Для решения этих проблем в настоящей диссертационной работе предлагается составлять матрицу решений на основе анализа совокупности возникающих неопределенных факторов с учетом связей и зависимостей между ними. При этом учитывается изменение состояния того компонента, относительно которого принимается решение.

Факторы неопределенности ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники разделяются на три группы: неопределенность внешней среды, неопределенность внутренних характеристик, неопределенность целей ИИУС. Как можно заметить, все три группы факторов находят свое отражение в обеспечивающих и управляющих характеристиках объекта. Исследование вероятностного пространства состояний ИИУС позволило выделить ситуации:

1) A_R^E – определено, $A_M^E \rightarrow 0$. Для определения совокупности решений в данной ситуации необходимо проанализировать состояния компонента в предыдущих итерациях ИИУС или референтной ИИУС. При анализе совокупности решений следует выбрать состояние, в котором $A_{iR}^E - A_{(i+1)R}^E \rightarrow \min$, а $A_{iG}^E - A_{(i+1)G}^E \rightarrow \max$ и $A_{iU}^E - A_{(i+1)U}^E \rightarrow \max$.

В случае невозможности выявления совокупности решений необходимо

создать отношений зависимости, агрегации и композиции между управляющими характеристиками и обеспечивающими с целью формирования значений для управляющих характеристик. Возможно создание отношений зависимости, агрегации или композиции с другими компонентами. После формирования управляющих характеристик необходимо перевести отношения в обобщающие и ассоциативные соответственно. При создании отношений и формировании управляющих характеристик необходимо выбрать такое состояние компонента, при котором выполняются указанные ранее выражения.

2) $A_R^E \rightarrow \infty$, A_M^E — определено. Аналогично, для определения совокупности решений в данной ситуации необходимо проанализировать состояния компонента в предыдущих итерациях ИИУС производственным процессом или референтной ИИУС. При анализе совокупности решений следует выбрать состояние, в котором $A_{iR}^E - A_{(i+1)R}^E \rightarrow \min$, а $A_{iG}^E - A_{(i+1)G}^E \rightarrow \max$ и $A_{iU}^E - A_{(i+1)U}^E \rightarrow \max$.

В случае невозможности выявления совокупности решения необходимо создание отношений реализации между обеспечивающими и развивающими характеристиками компонента с целью перераспределения значений обеспечивающих характеристик. Возможно создание отношений реализации с другими компонентами ИИУС производственным процессом. При этом выбрать состояние, при котором $A_{iR}^E - A_{(i+1)R}^E \rightarrow \min$, а $A_{iG}^E - A_{(i+1)G}^E \rightarrow \max$ и $A_{iU}^E - A_{(i+1)U}^E \rightarrow \max$.

3) $A_R^E \rightarrow \infty$, $A_M^E \rightarrow 0$. В этом случае для принятия решения и предотвращения бифуркации необходимо создание отношений зависимости, агрегации или ассоциации с другим компонентом ИИУС с целью определения управляющих и обеспечивающих характеристик. При определении характеристик отношения следует перевести в отношения обобщения и ассоциации. Критерий выбираемого состояния - $A_{iR}^E - A_{(i+1)R}^E \rightarrow \min$, а $A_{iG}^E - A_{(i+1)G}^E \rightarrow \max$ и $A_{iU}^E - A_{(i+1)U}^E \rightarrow \max$.

Таким образом, критерием принятия решения в условиях неопределенности внешней среды, внутренних характеристик и целей ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники является

$$K_{pr} = (A_{iR}^E - A_{(i+1)R}^E \rightarrow \min) \cap (A_{iG}^E - A_{(i+1)G}^E \rightarrow \max) \cap (A_{iU}^E - A_{(i+1)U}^E \rightarrow \max) \quad (3.33)$$

При удовлетворении решения данному критерию необходимо найти такое состояние компонента ИИУС, переход в который потребует минимума затрат обеспечивающих характеристик и при этом значительно улучшит основные и развивающиеся процессы (рис.3.9).

При наличии обратной связи управляющее воздействие может быть изменено, но критерий принятия решения при этом не изменится.



Рис.3.9. Схема алгоритма принятия решения в условиях неопределенности внешней среды, внутренних характеристик и целей ИИУС

Таким образом, состояния неопределенности находятся в трех блоках из девяти вероятностного пространства состояний ИИУС, что позволяет сократить совокупность решений в 3 раза (рис.3.10).

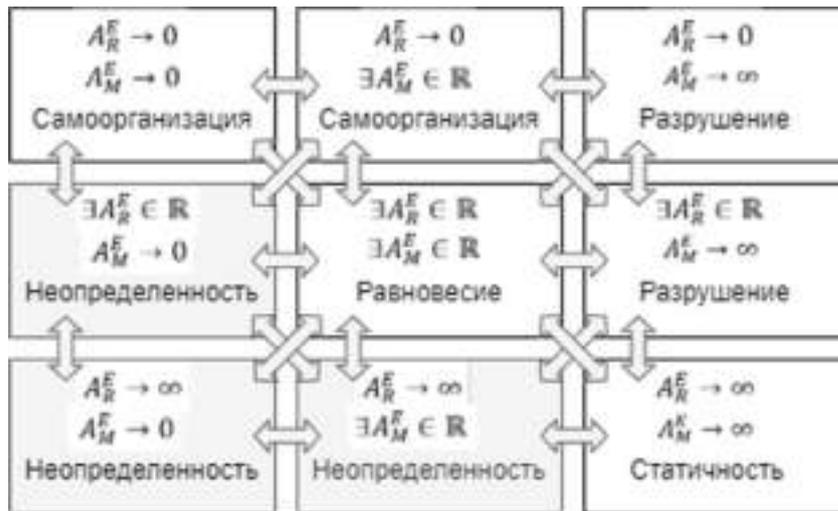


Рис.3.10. Сокращение вероятностного пространства состояний ИИУС

Учет условия перехода в другое состояние ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \geq 1$ позволяет дополнительно сократить совокупность возможных решений. Следовательно, разработанный алгоритм позволяет более чем в 3 раза повысить управляемость ИИУС за счет сокращения вероятностного пространства альтернатив, критерия принятия решения и условия перехода в новое состояние ИИУС.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Разработана математическая модель граничных состояний ИИУС производственным процессом для микро-и наноэлектроники и условий их наступления, которая получена на основе исследования поведения разработанной физической модели состояния ИИУС производственным процессом. Модель построена на основе физической системы, состоящей из простейшего рычага I типа, точка опоры которого соединена с закрепленными пружинами.

2. Разработана математическая модель изменения состояния ИИУС производственным процессом при внешнем управляющем воздействии. Модель основана на утверждении, что любая ИИУС в бесконечно малый момент вре-

мени представляет собой замкнутую систему. Модель позволяет математически описать динамику изменения состояния ИИУС.

3. Разработан алгоритм анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники, позволяющий определять условия формирования и корректировки управляющего воздействия. Базисом разработанного алгоритма является математический аппарат теории фракталов, а прогнозируемым состоянием является аттрактор системы итерированных функций состояния ИИУС.

4. Разработан алгоритм принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники. Алгоритм позволяет более чем в 3 раза повысить управляемость ИИУС за счет сокращения вероятностного пространства альтернатив, критерия принятия решения и условия перехода ИИУС из одного состояния в другое.

ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

4.1 ОСОБЕННОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В реальной производственной деятельности одни и те же объекты участвуют в различных ИИУС, инициируя тем самым взаимодействие ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники [197-201]. Графически взаимодействие между ИИУС с учетом вышесказанного представлено с использованием методологии структурного анализа (рис.4.1), когда каждый процесс или система может быть подвергнут декомпозиции на составляющие: сущности, хранилища сущностей, процессы и потоки данных [202, 203].

В контексте исследования взаимодействия объектов информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и нанoeлектроники, использование такой модели целесообразно исходя из следующего:

- визуализация входных и выходных потоков данных, а также потоков данных между различными компонентами ИИУС для эффективного контроля и управления процессами;
- идентификация процессов в системе производства микро- и нанoeлектроники, определение их последовательности выполнения и взаимосвязи;
- определение взаимодействия объектов;
- упрощение анализа взаимодействия объектов ИИУС за счет абстрактного представления структуры системы.

В результате исследования и моделирования взаимодействия компонен-

тов ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники получено, что взаимодействие представляет собой участие компонентов одной ИИУС в другой ИИУС. Выделены следующие типы взаимодействия: одностороннее, двустороннее и создающее. При одностороннем взаимодействии сущности одной ИИУС производственным процессом участвуют в работе другой ИИУС производственным процессом, но не наоборот (рис.4.2). При этом используются отношения зависимости и обобщения.

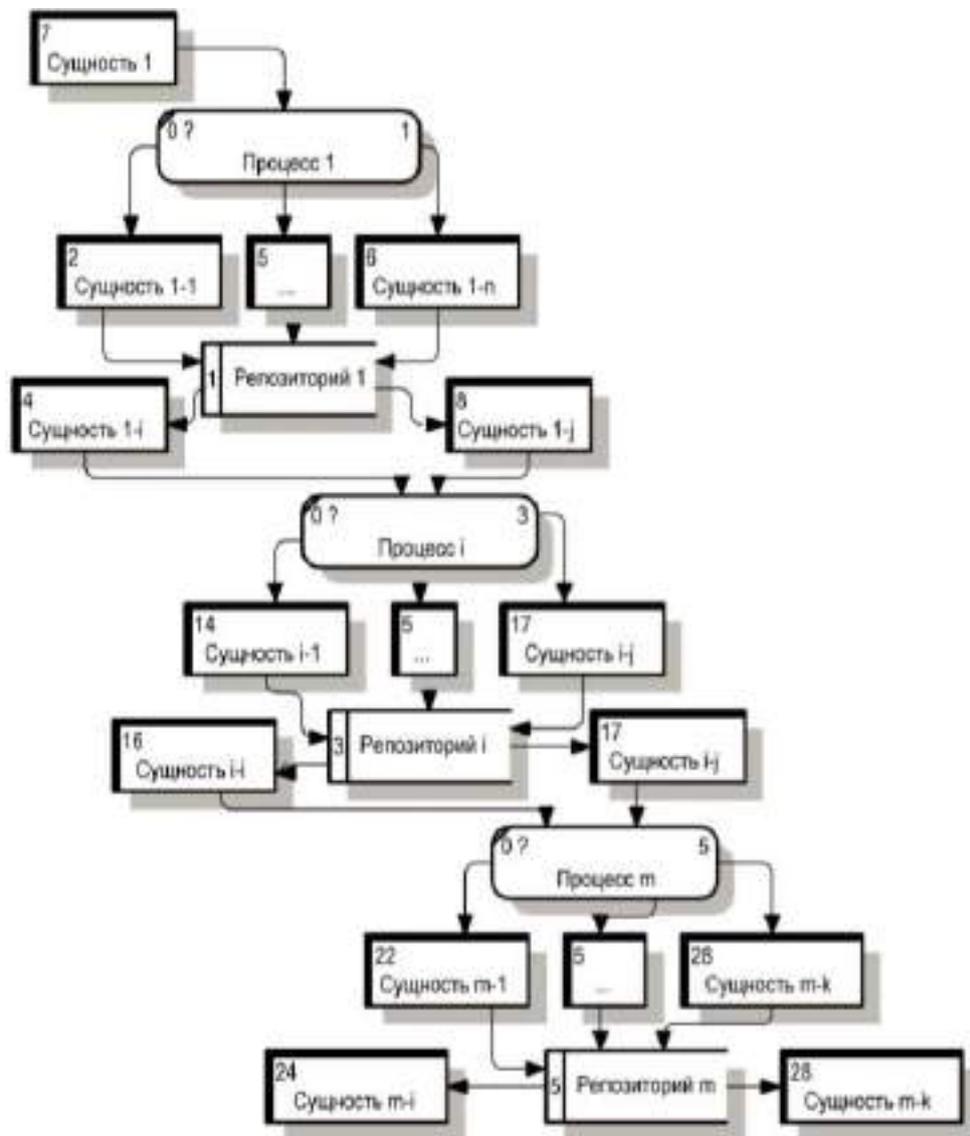


Рис.4.1. Модель потоков данных ИИУС

При двустороннем взаимодействии сущности обеих ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники участвуют в работе

друг друга (рис.4.3). Используются отношения ассоциации, в том числе композиция и агрегация, обобщения и реализации.

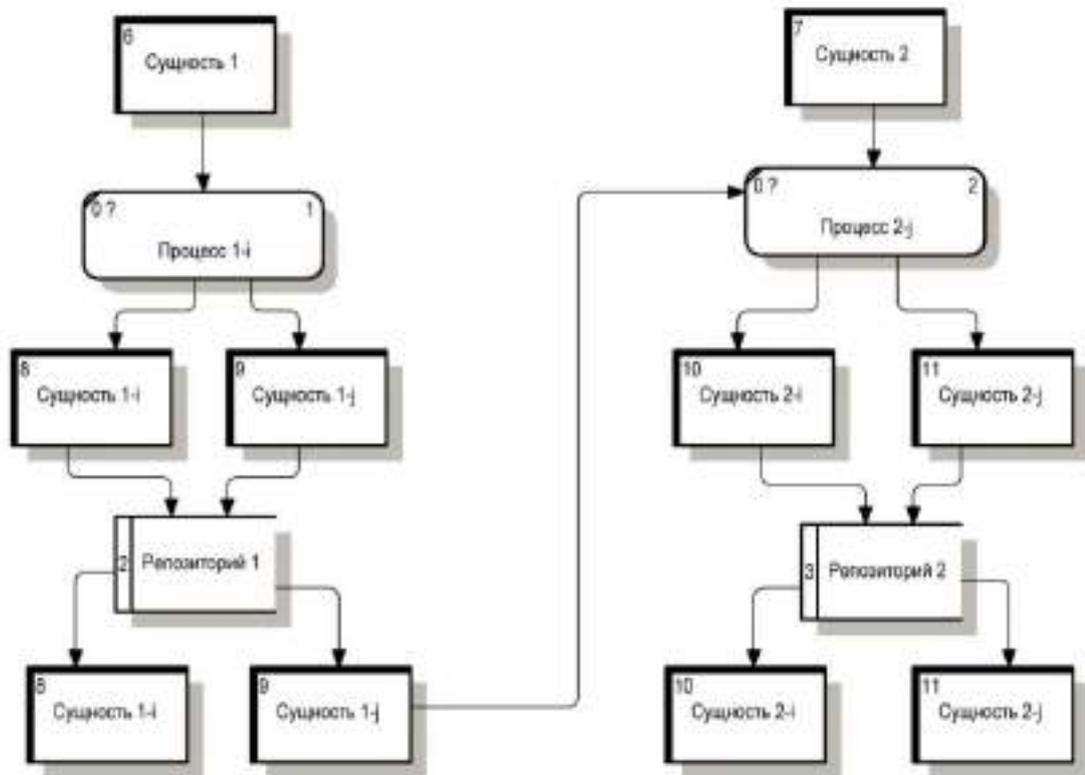


Рис.4.2. Модель взаимодействия двух ИИУС –
одностороннее взаимодействие

Создающее взаимодействие происходит при участии сущностей двух ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники в новой ИИУС. ИИУС считается новой, если сущности участвуют в ней впервые независимо от их состояния. Результатом такого взаимодействия является создание новой ИИУС производственным процессом. Выделены следующие типы создаваемых ИИУС: зависимая ИИУС, частично зависимая ИИУС и независимая ИИУС. ИИУС производственным процессом считается зависимой, если создаваемые в процессе ее работы сущности размещаются в репозиториях других ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники и могут быть ими использованы (рис.4.4).

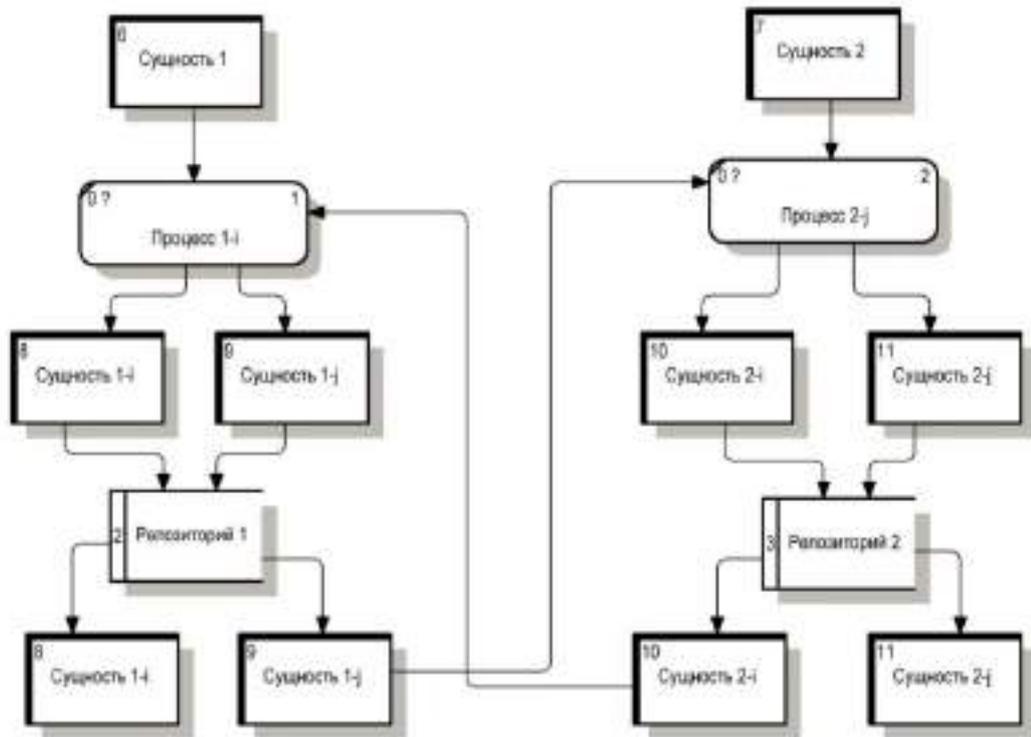


Рис.4.3. Модель взаимодействия двух ИИУС – двустороннее взаимодействие

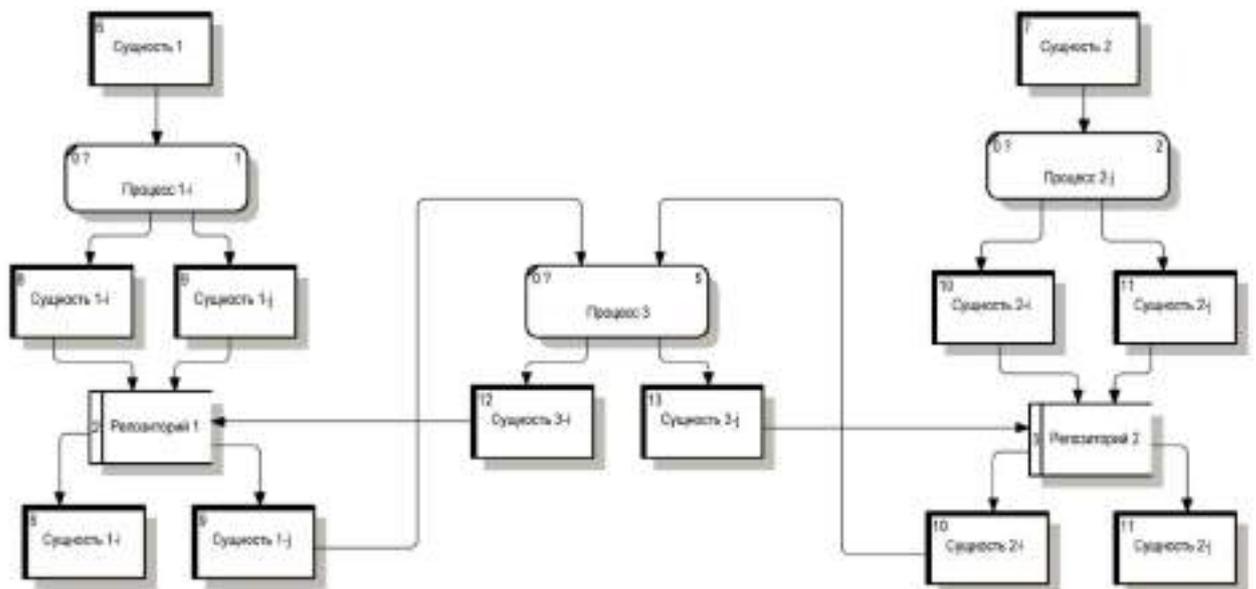


Рис.4.4. Модель создания новой ИИУС – полностью зависимая ИИУС

Частично зависимая ИИУС производственным процессом является результатом взаимодействия сущностей в новой ИИУС с образованием сущностей, которые частично размещены в репозитории новой ИИУС и в репозито-

риях других ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники (рис.4.5).

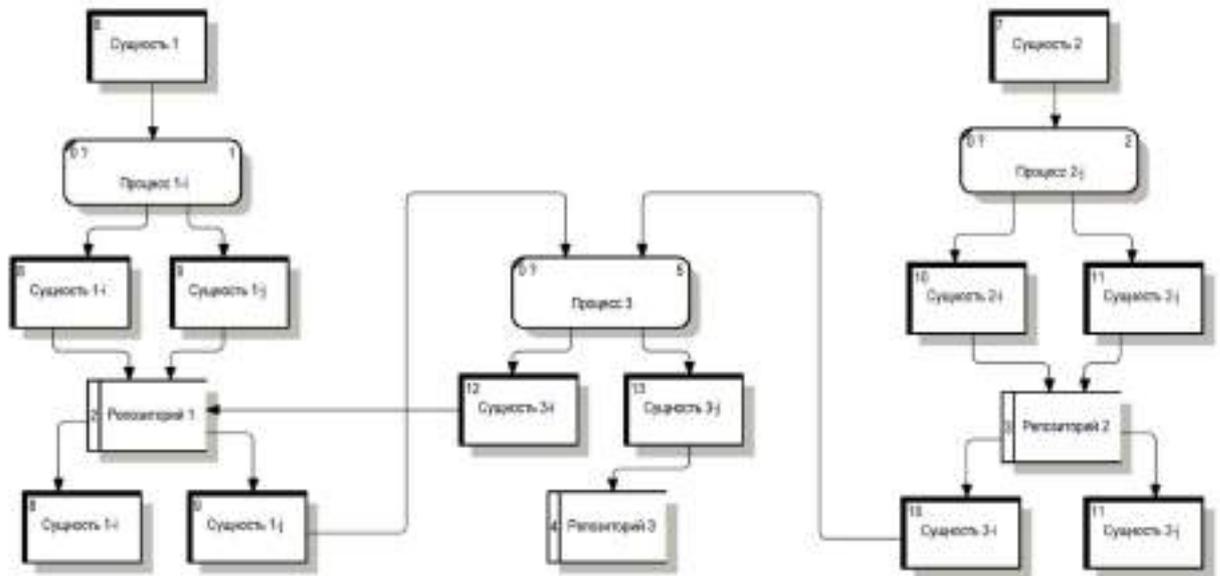


Рис.4.5. Модель создания новой ИИУС – частично зависимая ИИУС

ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники является независимой если все создаваемые в нем сущности располагаются в принадлежащих ей репозиториях и не используются в других ИИУС производственными процессами(рис.4.6).

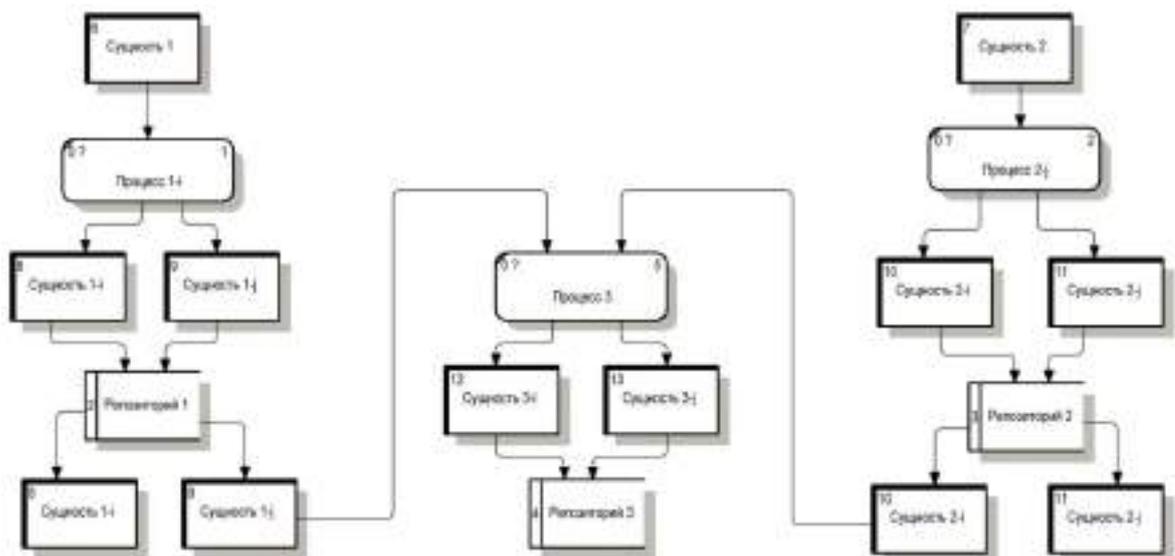


Рис.4.6. Модель создания новой ИИУС – независимая ИИУС

Таким образом, взаимодействие компонентов ИИУС, инициирующее интеграцию систем, способствует повышению эффективности, точности и автоматизации производственных процессов, что в конечном итоге приводит к улучшению качества продукции или услуг и снижению затрат.

В результате исследования выделены следующие типы взаимодействия компонентов ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники: одностороннее, двустороннее и создающее. Выделены типы ИИУС, создаваемых при их интеграции и взаимодействии: зависимая, частично зависимая и независимая. Тип взаимодействия и тип создаваемой ИИУС важны при прогнозировании поведения системы и при формировании управляющих воздействий. Для обеспечения взаимодействия между компонентами используются интерфейсы, имплементирующие методы получения и передачи данных [204-207]. Интерфейс считается корректным и полным, если:

- предоставляет необходимые и достаточные характеристики и операции для описания компонента и его состояния;
- предоставляет необходимую и достаточную информацию для организации взаимодействия с любым типом отношений.

Интеграция и взаимодействие ИИУС производственными процессами приводит к повышению функциональности и эффективности систем. Интеграция позволяет системам обмениваться данными в реальном времени. Это означает, что информация, собранная одной системой, может быть передана другой для дальнейшей обработки или анализа. В частности, информация об измерениях, полученная из информационно-измерительной системы, может быть автоматически передана в управляющую систему для корректировки процессов. Интеграция и взаимодействие систем позволяет ИИУС совместно использовать доступные ресурсы, такие как базы данных, вычислительные мощности и датчики. Это повышает эффективность использования ресурсов и позволяет оптимизировать процессы на основе более полной информации. Кроме того, взаимодействие систем позволяет объединить данные из различ-

ных источников для более глубокого анализа и принятия обоснованных решений. При этом ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники могут использовать данные друг друга для выявления паттернов, прогнозирования будущих событий и оптимизации работы.

4.2 РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССНЫХ МОДЕЛЕЙ ИНТЕРФЕЙСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Для определения типа и кратности отношений между сущностями разработана информационная модель ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники на основе диаграммы классов UML (Unified Modeling Language, универсальный язык моделирования), что позволяет определить количество компонентов и тип их соединения (рис.4.7). UML — язык графического описания для объектного моделирования в области разработки программного обеспечения, для моделирования бизнес-процессов, системного проектирования и отображения организационных структур [208-210].

Информационная модель ИИУС производственным процессом отображает существующие объекты (сущности, абстракции) и отношения между ними. Для обеспечения взаимодействия как между отдельными сущностями ИИУС, так и между собой используются интерфейсы. Интерфейс представляет собой общую границу между сущностями ИИУС производственными процессами или между самими ИИУС и имплементирует методы получения и передачи данных [211, 212]. В интерфейс выносятся внешние и, в некоторых случаях, внутренние изменяемые характеристики сущности. Сущности и ИИУС в целом могут использовать множество интерфейсов. С интерфейсами ассоциированы сигналы.

Правильно организованный интерфейс представляет четкое разделение внешнего и внутреннего представления сущности, обеспечивая понятность и доступность без необходимости погружения в детали его реализации.



Рис.4.7. Обобщенная информационная модель ИИУС

Для формирования требований к интерфейсу следует использовать описание ролей взаимодействующих объектов:

$$N_R^E = \langle A_{1R}^E, \dots, A_{nR}^E, V_{1R}^E, \dots, V_{nR}^E, O_{1R}^E, \dots, O_{mR}^E, R_{1R}^E, \dots, R_{kR}^E \rangle \quad (4.1)$$

Для моделирования интерфейсов ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники или сущности следует выполнить:

- 1) определить границы между сущностями или ИИУС производственными процессами, которые взаимодействуют друг с другом;
- 2) сущности или ИИУС производственными процессами, которые изменяются совместно, необходимо объединить в кооперации;
- 3) определить данные, функции или сигналы, которые пересекают границы, проведенные в п.1, между сущностями и системами;
- 4) объединить логически связанные наборы функций или сигналов;
- 5) для каждой кооперации определить интерфейсы, которые ей требуются (импортируемые), и которые она предоставляет (экспортирует). Импорт

интерфейсов моделируется отношениями зависимости, экспорт – отношением реализации.

б) для каждого интерфейса необходимо определить динамику его состояния с пост- и предусловиями каждой операции, а также варианты его использования.

В момент создания сущности происходит назначение ей типа и ролей. У сущностей статической природы тип и роли остаются неизменными на протяжении всего жизненного цикла. При моделировании динамических сущностей и ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники следует учитывать изменение типа и роли в процессе функционирования. Тип и роль определяют текущее состояние объекта.

Для моделирования динамического типа необходимо:

- 1) для каждой сущности или ИИУС производственным процессом определить возможные типы в виде класса (если требуется описание структуры и поведения) или интерфейса (для описания поведения);
- 2) смоделировать все роли, которые принимает класс сущности в любой момент времени;
- 3) описать состояния сущности с использованием совокупности полученных классов и ролей.

В ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники объекты взаимодействуют друг с другом, передавая сообщения. Сообщение – это спецификация взаимодействия объектов, которая передает информацию и ожидает дальнейших действий. Для моделирования взаимодействия необходимо:

- 1) Установить контекст и кратность взаимодействия.
- 2) Определить фазы взаимодействия, выделив роли объектов. Установить начальные характеристики объектов.
- 3) Определить отношения взаимодействующих объектов.
- 4) В соответствии с временной последовательностью указать сообщения, передаваемые от объекта к объекту.

- 5) Определить роль объектов при передаче и получении сообщений.
- 6) Для упорядоченного по времени управляющего воздействия необходимо выделять передачу сообщений в хронологическом порядке.

На рис.4.8 показаны взаимодействующие объекты с определенными ролями и управляющими воздействиями.

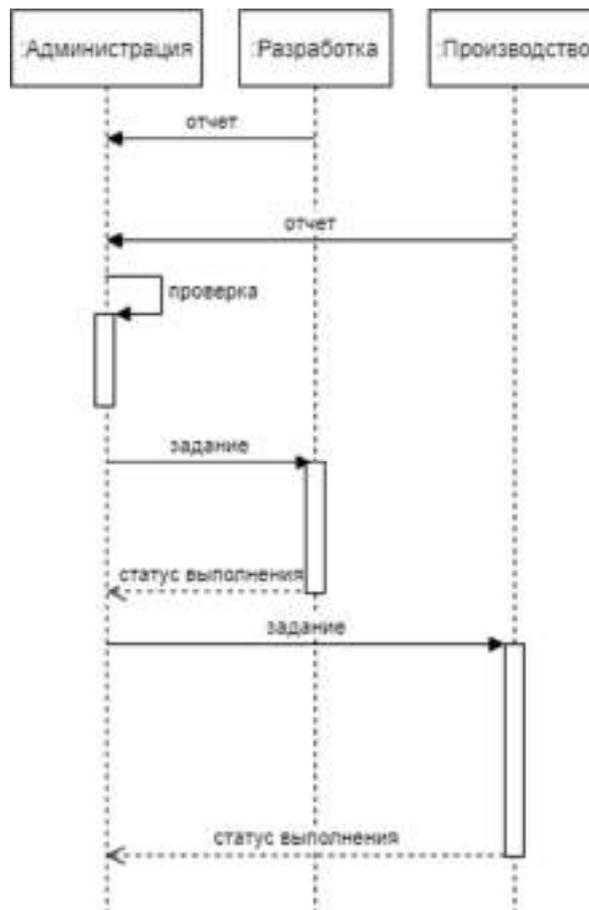


Рис.4.8. Взаимодействие между объектами ИИУС

Для определения требований и соглашений к объектам для установления отношений реализации необходимо:

- 1) Установить контекст взаимодействия между ИИУС производственными процессами или объектами.
- 2) Рассмотреть ожидаемое поведение объектов.
- 3) Обобщить это поведение в виде вариантов использования.

4) Выделить общее поведение в новые варианты использования, на которые ссылаются другие варианты; выделить разновидности поведения в новые варианты использования, расширяющие основные потоки.

5) Определить варианты использования для обработки ошибок.

Для моделирования поведения объекта/ИИУС необходимо построить иерархическую структуру объекта/ИИУС (рис.4.9).



Рис.4.9. Иерархическая структура ИИУС

Для перехода состояния объекта информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом из одного в другое необходимо управляющее воздействие или событие. Часто инициатором перехода между состояниями служит сигнал – это разновидность управляющего воздей-

ствия, при котором сообщение передается асинхронно от одного объекта другому. Управляющие воздействия делятся на внешние (передаются от объекта к объекту) и внутренние (инициируются внутри объекта). Для обработки управляющих воздействий используются функции, определенные в модели ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники. Управляющее воздействие является входным параметром для данной функции.

При моделировании управляющих воздействий необходимо выделить такие, при которых объект переходит в хаос. Это позволит определить действия в функциях для их корректной обработки.

1) Для объектов и функций рассмотреть с учетом отношений между элементами устойчивые и неустойчивые состояния и смоделировать их возникновение в виде управляющего воздействия.

2) Построить иерархическую структуру управляющих воздействий и функций по их обработке с учетом отношений между объектами информационно-измерительной и управляющей системы производственными процессами. На верхних уровнях иерархической структуры разместить общие управляющие сигналы, а на нижних – специализированные. Добавить функции, обрабатывающие исключения.

3) Для каждой функции определить исключения – какие неустойчивые состояния вызываются и при каком управляющем воздействии.

При моделировании поведения одновременно участвующих в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники объектов необходимо смоделировать поведение объектов в отдельности с учетом обмена сообщениями между ними. Для моделирования поведения объекта используется конечный автомат. Недостатком данной модели является общая детерминированность входного сигнала, выходного, состояния. Но в совокупности с описанием для каждой операции исключительных ситуаций данный недостаток устранен (рис.4.10).

Для моделирования поведения объекта необходимо:

- 1) Установить начальное и конечное состояние объекта в ИИУС производственным процессом.
- 2) Определить другие объекты и отношения с ними.
- 3) Сформировать интерфейсы для объекта.
- 4) От начального до конечного состояния объекта в ИИУС выделить состояния высшего уровня с указанием управляющего воздействия для перехода в это состояние.
- 5) Определить состояния более низких уровней с указанием управляющего воздействия.
- 6) Определить исключительные ситуации и способы их обработки.
- 7) Провести верификацию полученной модели поведения объекта путем сравнения состояний объекта с узлами иерархической структуры ИИУС производственным процессом.



Рис.4.10. Модель поведения объекта с обработкой исключительных ситуаций

Для решения обратной задачи – моделирование объекта по его поведению, - необходимо определить:

- 1) состояния объекта и управляющие воздействия, их вызывающие;
- 2) состояние объекта в исключительных ситуациях;
- 3) взаимодействующие объекты, отношений между ними;
- 4) интерфейсы объектов и их характеристики;
- 5) роли объекта в ИИУС производственными процессами, в которых он участвует;
- 6) иерархические структуры ИИУС производственными процессами, в которых участвует объект с учетом его роли;
- 7) характеристики, их значения, функции и отношения между элементами объекта и формирование на основе полученной информации модели объекта ИИУС.

Полученная таким образом модель объекта будет тем полнее, чем больше ИИУС, в которых участвует объект, было проанализировано.

На основании моделей объектов возможно получение модели ИИУС производственными процессами, в состав которого они входят. Таким образом на основе разработанных в настоящей диссертационной работе моделей, алгоритмов и методов работы с ИИУС решается задача наблюдаемости ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

4.3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ

Исключительная ситуация в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами - это нештатная ситуация, которая возникает в системе и может привести к сбоям, неправильной работе или остановке производственного процесса. Исключительные ситуации могут

быть вызваны различными причинами, такими как отказ оборудования, нарушение связи, ошибки в программном обеспечении, внешние воздействия или другие факторы. Управление и контроль за исключительными ситуациями важны для обеспечения надежности и безопасности производственных процессов [59, 82, 156, 213, 214]. Под обработкой исключительных ситуаций в настоящей диссертационной работе подразумевается реакции ИИУС или составляющих ее объектов на ошибки, сбои и другие возможные проблемы, которые возникают при работе ИИУС производственными процессами и приводят к бессмысленности дальнейшей работы ИИУС в соответствие с ее иерархической структурой.

Во время выполнения ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники под влиянием нелинейных факторов возникают ситуации, когда состояние внешних устройств и объектов, входных составляющих, контрольно-измерительных приборов, исполнительных механизмов и оборудования или системы управления в целом является неопределенным и делает дальнейшее выполнение ИИУС в соответствие с его иерархической структурой невозможным или бессмысленным. Примерами подобных ситуаций являются:

- Отказ измерительного оборудования. В процессе работы ИИУС периодически возникают ситуации, когда измерительное оборудование перестает работать или дает неправильные результаты. Данный факт может быть вызван поломкой оборудования, неисправностью датчиков или ошибкой в программном обеспечении.

- Нарушение связи. Системы управления производственными процессами часто используют сетевые соединения для передачи данных между компонентами системы. Исключительная ситуация может возникнуть, если связь между компонентами прерывается или становится неправильной. Кроме того, данная исключительная ситуация может быть вызвана сбоем в сети, неисправностью оборудования или ошибкой в настройках сети.

- Неправильное управление процессом. Возможно возникновение ситуации, когда ИИУС производственным процессом дает неправильные команды или не учитывает изменения внешних условий, что приводит к неправильной работе оборудования или некорректному выполнению процесса.

- Перегрузка системы. Если информационно-измерительные и управляющие системы не могут обрабатывать большой объем данных или выполнить большое количество операций одновременно, может возникнуть перегрузка системы. Это может привести к замедлению работы системы или ее полной остановке.

- Несанкционированный доступ. ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники могут стать объектом атак со стороны злоумышленников. Это может привести к несанкционированному доступу к системе, изменению параметров процесса или повреждению оборудования.

- Неправильная обработка данных. Если ИИУС производственным процессом неправильно обрабатывает данные, это может привести к неправильным решениям или некорректной работе системы управления производственным процессом.

Все эти исключительные ситуации несут серьезные последствия для производственного процесса, поэтому важно иметь надежные механизмы контроля и защиты информационно-измерительных и управляющих систем.

Согласно принятой классификации исключительных ситуаций, возникающих при работе ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники, выделяют синхронные и асинхронные типы ситуаций. При этом методы обнаружения и обработки исключительных ситуаций для каждого типа существенно отличаются.

Синхронные исключительные ситуации в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами возникают, когда несколько событий происходят одновременно или в определенной последовательности, что может привести к нарушению работы системы [215-217].

Наиболее распространенной причиной возникновения синхронной исключительной ситуации являются конфликты доступа к ресурсам, при которых несколько компонентов системы пытаются получить доступ к одному ресурсу одновременно. Данный факт приводит к блокировке или неправильной работе системы. Для устранения этой ситуации можно использовать механизмы синхронизации, такие как мьютексы или семафоры, чтобы обеспечить взаимное исключение при доступе к ресурсам.

Мьютексы и семафоры - это механизмы синхронизации, используемые в многозадачных операционных системах для управления доступом к общим ресурсам и предотвращения конфликты за ресурсы между потоками или компонентами. Мьютекс представляет собой объект синхронизации, который позволяет одному компоненту за раз получить доступ к общему ресурсу. Если мьютекс уже занят другим компонентом, то компонент, пытающийся получить доступ к ресурсу, будет заблокирован до тех пор, пока мьютекс не освободится. Мьютексы обычно используются для обеспечения эксклюзивного доступа к критическим секциям кода или общим ресурсам, чтобы избежать конфликтов за данные и обеспечить их целостность. Мьютексы имеют два состояния - заблокированный (занятый) и разблокированный (свободный). Основная особенность мьютексов заключается в том, что они обеспечивают взаимное исключение для компонентов, гарантируя, что только один компонент может одновременно работать с общим ресурсом.

Семафор - это счетчик, который используется для контроля доступа к общему ресурсу в многопоточной среде. Семафор может поддерживать значение больше одного, что позволяет нескольким компонентам одновременно получить доступ к ресурсу. Семафоры часто используются для управления количеством компонентов, которые могут одновременно получить доступ к определенному ресурсу или выполнить определенную операцию. Существуют два типа семафоров - бинарные семафоры (которые могут принимать значения 0 или 1) и счетные семафоры (которые могут принимать любые неотрицательные значения). Основные операции над семафорами включают уменьшение

(wait) и увеличение (signal) значения семафора.

Использование мьютексов и семафоров позволяет эффективно управлять доступом к общим ресурсам в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, предотвращая конфликты за данные и обеспечивая корректное выполнение операций в многозадачной среде.

Другой распространенной причиной возникновения синхронных исключительных ситуаций в работе ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники является одновременный доступ для изменения одних и тех же данных различных компонентов. Подобная ситуация приводит к непредсказуемым результатам и ошибкам в системе. Для предотвращения конфликта данных можно использовать механизмы блокировки или транзакций, чтобы обеспечить последовательный доступ к данным.

Блокировка позволяет создать временное ограничение доступа к общему ресурсу конкретному компоненту ИИУС производственным процессом, чтобы предотвратить конфликты и обеспечить целостность данных. В информационно-измерительных и управляющих системах блокировки часто используются для защиты критических секций кода или общих ресурсов от одновременного доступа нескольких компонентов, что может привести к некорректным результатам или повреждению данных. Существуют различные типы блокировок, такие как мьютексы, семафоры, рекурсивные блокировки и другие, которые могут быть использованы в зависимости от конкретных потребностей системы.

Транзакция в отличие от блокировки позволяет создавать логическую единицу работы, состоящую из одной или нескольких операций базы данных, которые должны быть выполнены атомарно, согласованно, изолированно и долговечно (ACID-свойства). В информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами для микро- и наноэлектроники транзакции используются для обеспечения целостности данных при выполнении операций чтения и записи. Транзакции гарантируют успешное выполнение всех операций либо отмену выполнения всех операций в случае какой-

либо ошибки. Примерами транзакций могут быть операции обновления базы данных, любые другие последовательные операции, которые должны быть выполнены атомарно.

Комбинация блокировки и транзакций позволяет эффективно управлять доступом к данным в информационно-измерительных и управляющих системах, предотвращая конфликты и обеспечивая целостность и надежность операций.

Некоторые ИИУС производственными процессами имеют временные ограничения, которые должны быть соблюдены. Нарушение этих ограничений приводит к сбоям или неправильной работе системы. Для обнаружения и устранения этой ситуации используются мониторинг и контроль времени выполнения задач.

Неправильно разработанное или ошибочное программное обеспечение ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники также вызывает исключительные ситуации в системе. Для предотвращения и обнаружения таких ошибок необходимо проводить тщательное тестирование и верификацию программного обеспечения ИИУС.

Выход из строя исполнительного, контрольно-измерительного и другого оборудования также приводит к синхронным исключительным ситуациям. Для обнаружения отказов оборудования используются системы мониторинга, а для устранения отказов необходимо своевременно проводить регулярное техническое обслуживание и замену неисправных компонентов.

Обнаружение и устранение синхронных исключительных ситуаций требует системного подхода, включающего в себя правильное проектирование ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники, использование соответствующих механизмов синхронизации и контроля, а также постоянный мониторинг и обслуживание системы.

Асинхронные исключительные ситуации в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами возникают, ко-

гда события происходят в непредсказуемом порядке или с различными интервалами времени, что приводит к ошибкам или сбоям в работе системы [218, 219]. В частности, асинхронные исключительные ситуации возникают в состоянии, при котором несколько компонентов ИИУС производственным процессом изменяют общее состояние системы в непредсказуемом порядке, что приводит к некорректному поведению системы или потере данных. Для обработки подобных конфликтов состояний используются механизмы блокировки, транзакций или атомарных операций для обеспечения целостности данных.

Асинхронные запросы или события приводят к перегрузке ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, когда она неспособна обрабатывать все поступающие запросы одновременно. Для обработки подобных исключительных ситуаций используются методы управления нагрузкой, такие как очереди задач или механизмы отказоустойчивости. Следствием перегрузки ИИУС производственным процессом или ее компонента является исключительная ситуация, при которой ИИУС не может получить ожидаемого ответа от других компонентов из-за асинхронности выполнения задач. Для обработки данной исключительной ситуации используются механизмы таймаутов или повторной отправки запросов для обеспечения надежной коммуникации между компонентами.

Кроме того, различные компоненты ИИУС производственными процессами могут работать с разными версиями данных или несогласованными данными из-за асинхронности обновлений. Для обработки подобных ситуаций в работе ИИУС используются методы и средства согласования данных или транзакций для обеспечения целостности и коммутативности данных.

Важным моментом, приводящим к возникновению исключительных ситуаций в работе ИИУС производственными процессами, является организация передачи сообщений между компонентами системы в асинхронном режиме, что приводит к ошибкам в коммуникации, потере сообщений или дублированию сообщений. Для обработки этой ситуации предлагается использовать механизмы подтверждения доставки сообщений и обработку дубликатов.

Обнаружение и обработка асинхронных исключительных ситуаций требует разработки надежных и отказоустойчивых ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, использования соответствующих механизмов контроля и управления, а также постоянного мониторинга и анализа работы системы для выявления потенциальных проблем.

Обнаружение, предотвращение и обработка исключительных ситуаций в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами для микро- и наноэлектроники играют важную роль в обеспечении стабильности и надежности производственных процессов. Среди универсальных методов эффективного управления исключительными ситуациями следует выделить:

- Мониторинг и диагностику состояния ИИУС и оборудования с целью заблаговременного выявления потенциальных проблем. Использование датчиков, измерительных приборов и систем мониторинга помогает отслеживать ключевые параметры производства и ИИУС, как в целом, так и покомпонентно.

- Управление рисками внедрения и использования ИИУС производственными процессами. Оценка рисков и разработка стратегий их управления позволяют предотвращать и минимизировать последствия возможных сбоев и аварий.

- Резервирование данных и настройка систем автоматического восстановления после сбоев позволяет предотвратить потерю информации. Кроме того, использование дублирующего оборудования и систем для обеспечения непрерывной работы также позволяет минимизировать потери, после внезапного выхода из строя компонента ИИУС или отключения энергии.

- Использование систем контроля и управления процессами с обратной связью позволяет быстро реагировать на изменения и аварийные ситуации, а также стабилизировать производственные процессы.

- Проведение обучения персонала по действиям в случае аварийных ситуаций. Кроме того, следует регулярно проводить подготовку сотрудников к

работе с системами мониторинга, диагностики и управления ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

- Своевременное проведение анализа данных и оптимизация производственных процессов для предотвращения возникновения проблем при работе ИИУС. Использование методов статистического анализа позволит выявить аномалий, предсказать возможные проблемы и разработать меры по их устранению.

Рассмотренные методы позволяют обеспечить надежность и стабильность работы ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники. Повышение управляемости ИИУС при возникновении исключительных ситуаций требует комплексного подхода и применения различных дополнительных методов. Разработка аварийных сценариев, описывающих возможные исключительные ситуации в работе ИИУС и шаги по их устранению, позволяет минимизировать последствия сбоев и выявить узкие места в работе ИИУС производственными процессами. При этом, возможно использование разработанных сценариев при обучении персонала по действиям в случае аварийных ситуаций. При разработке сценариев возможно использование методов нелинейной динамики, предиктивной аналитики и других алгоритмов прогнозирования. Использование в ИИУС производственными процессами обратной связи позволит реализовать не только оперативное получение информации о состоянии системы и процессов, но формировать управляющие воздействия для корректировки состояния компонентов ИИУС в реальном времени. При разработке и проектировании ИИУС производственными процессами с целью повышения ее управляемости в исключительных ситуациях следует особое внимание уделить контролю доступа и безопасности, обеспечению защиты информации от несанкционированного доступа; составлению планов действий по восстановлению ИИУС после кибератак или других атак [218, 219].

Описанные выше подходы и способы позволяют повысить управляе-

мость информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники при возникновении исключительных ситуаций и обеспечить эффективное управление в хаотическом состоянии.

По типу управления выделяют методы обработки исключительных ситуаций в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники с возвратом и без возврата.

Метод обработки исключительных ситуаций в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами с возвратом представляет собой подход, при котором ИИУС получает информацию о своем текущем состоянии и результате действий, а затем использует эту информацию для корректировки своего поведения. При этом возможно использование специального компонента ИИУС, отвечающего за управление системой в исключительных ситуациях. Такие компоненты и существующие технологии Индустрии 4.0 предоставляют возможность использования двух стандартных процедур подключения компонентов для обработки исключительных ситуаций: регистрация компонента и разрегистрация компонента. Регистрация компонента позволяет подключить обработчик к определенной исключительной ситуации, разрегистрация – отменяет такое подключение. В этом случае, при возникновении исключительной ситуации происходит прерывание основного программного обеспечения компонента, управляющего состоянием ИИУС, и начинается исполнение программного кода компонента, отвечающего за обработку исключения.

К достоинства рассматриваемого подхода следует отнести высокую адаптивность ИИУС к изменениям в окружающей среде или внутри самой системы; повышение качества ИИУС за счет постоянной обратной связи и корректировки состояния системы; повышение стабильности при возникновении критических и внештатных ситуаций. Однако, постоянная обработка информации и корректировка состояния приводит к замедлению работы системы. Кроме того, для правильной интерпретации информации и формирования

управляющих воздействий следует корректно настроить параметры обратной связи, что является не тривиальной задачей. Несмотря на указанные недостатки, метод обработки исключительных ситуаций с возвратом широко применяется в ИИУС производственными процессами, в которых требуется быстрая коррекция действий на основе обратной связи, и является эффективным инструментом для повышения управляемости, качества работы ИИУС и оптимизации использования ресурсов.

Метод обработки исключительных ситуаций в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами для микро- и нанoeлектроники без возврата представляет собой подход, при котором система принимает решения и корректирует свое поведение на основе предварительно известной информации о внешних условиях и требованиях, без использования обратной связи о результатах своих действий. Для ИИУС производственными процессами с использованием метода обработки исключительных ситуаций без возврата характерна проактивность – способность системы предотвращать возможные проблемы на основе заранее известной информации. При этом заранее определенные действия позволяют системе быстро адаптироваться к изменяющимся условиям. Основным преимуществом данного метода перед методом с возвратом является его простота реализации и настройки. Однако, ИИУС производственными процессами теряет способность адаптироваться к неожиданным изменениям или ситуациям. Кроме того, без обратной связи система может не исправлять недочеты или ошибки в работе, информация о внешних условиях может быть неполной или неточной, что влияет на качество принимаемых решений. Метод обработки исключительных ситуаций без возврата представляет собой эффективный подход в случаях, когда условия работы системы относительно стабильны и предсказуемы, а также когда заранее известны параметры процессов и требования к результатам. Однако он может иметь ограничения в адаптации к изменяющимся условиям и требует более точного определения параметров для эффективной

работы. Как правило, метод обработки без возврата используется для синхронных исключительных ситуаций в работе ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

В процессе исследования способов реализации компонентов системы, предназначенных для обработки исключений, выделено два типа обработки информации о параметрах ИИУС производственными процессами и внешних условиях: неструктурная и структурная [218, 219].

Неструктурная обработка исключительных ситуаций в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами представляет собой подход, при котором система принимает решения и корректирует свое поведение на основе анализа и классификации неструктурированных данных, таких как текст, изображения, аудио и видео. Неструктурная обработка наиболее часто используется при возникновении асинхронных исключительных ситуаций.

При использовании неструктурированного подхода к обработке исключительных ситуаций в ИИУС основное внимание уделяется анализу текстовой информации (сообщения об ошибке, журналы действий и событий, отчеты) для выявления и классификации проблем; анализу графической информации с целью обнаружения аномалий или необычных ситуаций; анализу аудиоданных для выявления аномальных звуков или шумов. При этом широкое распространение получили методы машинного обучения для разметки данных, извлечения признаков исключительных ситуаций и классификации новых неструктурированных данных. Основным преимуществом неструктурированной обработки исключительных ситуаций в ИИУС является использование естественного языка для анализа текстовых данных и классификации проблем.

Неструктурированная обработка исключений позволяет выявлять нестандартные или неожиданные ситуации, которые могут быть упущены при стандартных методах обработки. Кроме того, такой подход позволяет автоматизировать процесс обработки исключительных ситуаций, что ускоряет реакцию ИИУС производственными процессами на проблемы. При этом, ИИУС

адаптирована для работы с различными типами неструктурированных данных и проблемами.

Однако, следует отметить высокую требовательность к данным при использовании неструктурированного подхода к обработке исключительных ситуаций. Для точной работы и качественной обработки исключений необходимы большие объемы размеченных данных для обучения моделей машинного обучения. Кроме того, данный подход требует специализированных знаний в области машинного обучения, предиктивной аналитики и обработки неструктурированных данных.

Несмотря на указанные недостатки, неструктурированная обработка исключительных ситуаций довольно широко применяется в ИИУС производственными процессами, где текстовые, графические и аудио данные являются важным источником информации. Данный подход применяется для автоматического анализа различных журналов ИИУС производственными процессами, мониторинга безопасности, детектирования аномалий и выявления проблем в реальном времени.

Неструктурная обработка исключительных ситуаций в информационно-измерительных и управляющих системах позволяет системам эффективно анализировать и классифицировать неструктурированные данные для выявления проблем и принятия соответствующих решений. Однако этот подход требует большого объема размеченных данных для обучения моделей и специализированных знаний для его реализации.

Структурная обработка исключительных ситуаций в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами для микро- и наноэлектроники представляет собой методологию, направленную на эффективное управление и реагирование на нештатные ситуации в системах автоматизации. При этом используется проактивный подход, предлагающий предварительное определение возможных исключительных ситуаций и разработку соответствующих стратегий для их предотвращения или минимизации последствий. При этом в рамках системы осуществляется фокусировка

на реагировании на уже возникшие исключительные ситуации, включая методы быстрого обнаружения, диагностики и устранения проблем. Таким образом, структурная обработка исключительных ситуаций в работу ИИУС основана на определении потенциальных исключений и их анализа для разработки соответствующих стратегий; разработке процедур и алгоритмов для реагирования на различные типы исключительных ситуаций; проверке разработанных методов обработки на реальных или модельных данных, а также обучение персонала по применению этих методов. Кроме того, структурная обработка исключительных ситуаций способствует повышению надежности систем за счет предвидения и реагирования на потенциальные проблемы; позволяет минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций и обеспечивает безопасность процессов; позволяет ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники быстро и эффективно реагировать на непредвиденные ситуации. При этом разработка структурной обработки исключительных ситуаций может потребовать значительных усилий и ресурсов и требует постоянного обновления и адаптации к изменяющимся условиям и требованиям.

Структурная обработка исключительных ситуаций играет важную роль в обеспечении надежности, безопасности и эффективности работы информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники. Однако ее успешная реализация требует комплексного подхода к анализу, проектированию и тестированию, а также постоянного обновления в соответствии с изменяющимися условиями эксплуатации.

Независимо от выбранного типа управления и способа обработки информации при возникновении исключительных ситуаций в работе ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, программный модуль компонента, управляющего системой должен включать в себя функции логирования действий и условные операторы для обработки ошибок [207, 211, 220]. Важным аспектом при разработке программного кода по обработке

исключений является выполнение требования по предотвращению утечки оперативной и постоянной памяти ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники [221].

В процесс исследования обработки исключительных ситуаций в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники получено, что в некоторых случаях обработка исключений в текущем программном блоке возможна лишь частично. Управляющие компоненты поддерживают программные модули с гарантированным завершением обработки исключительных ситуаций. Такие компоненты целесообразно применять в случае использования программного кода, в котором определены обязательные действия, необходимые для выполнения в любом случае, даже если произошло исключение, требующее завершения работы ИИУС производственным процессом. Следует отметить, что компонент обработки исключений с гарантированным завершением в большинстве случаев реализуется с помощью механизма структурной обработки, для этого в программный код компонента необходимо поставить команду генерации исключительной ситуации непосредственно перед завершением контролируемого программного блока и правильно написать программный код обработчика [222]. При этом наличие отдельной конструкции для данного программного блока позволяет сделать его код более прозрачным и защитить от случайных ошибок, связанных с человеческим фактором.

Область действия компонентов обработки исключительных ситуаций начинается специальным языковым маркером начала программного блока и заканчивается перед описанием программных операторов обработчика исключений. Возможно использование нескольких компонентов обработки исключительных ситуаций в одном программном коде [223, 224]. В этом случае их описание следует один за одним и перед каждым указывается тип обрабатываемой исключительной ситуации. Как правило, никакого подбора подходящего компонента обработки исключений не производится и управление передается первому обработчику, совместимому по типу исключения. Следова-

тельно, при реализации программного кода компонентов обработки исключительных ситуаций важно учитывать порядок следования программного кода обработчиков. Поскольку, если совместимый с многими или всеми типами обработчик исключений окажется в тексте программного кода ранее специфических обработчиков исключений для конкретного типа ситуаций, то специфическим обработчикам управление не передастся.

При возникновении исключительных ситуаций в информационно-измерительных и управляющих системах производственными процессами для микро- и нанoeлектроники, последовательность передачи управления между компонентами организуется следующим образом:

1. Обнаружение исключительной ситуации. На данном этапе датчики или другие контрольно-измерительные устройства обнаруживают аномалии или отклонения от нормы в работе системы. При этом система мониторинга и диагностики определяет нештатные ситуации. Это продолжается до тех пор, пока компонент по обработке исключений не найдется и не обработается возникшая исключительная ситуация или пока возникшее исключение не выйдет за пределы определенных компонентов обработки и не будет передано для обработки системным программным обеспечением управляющего компонента, заданному по умолчанию и аварийно завершающему ИИУС производственным процессом.

2. Идентификация и анализ проблемы. Компоненты ИИУС производственными процессами анализируют данные и информацию о возникшей исключительной ситуации. Алгоритмы и методы обработки данных позволяют определить причины проблемы.

3. Принятие решения. На основе анализа и идентификации проблемы, управляющие компоненты системы принимают решение о дальнейших действиях: либо автоматическое исправление проблемы, либо формирование рекомендаций для оператора.

4. Исполнение действий. В зависимости от решения, принятого на

предыдущем этапе, управляющие компоненты инициируют исправление проблемы с изменением характеристик ИИУС производственным процессом, переключение на резервные устройства или активацию аварийных процедур. При этом произойдет передача управления на первый оператор обработчика исключения. После этого весь блок контролируемого программного кода завершится и произойдет передача управления на следующий за ним программный оператор. При реализации программного обеспечения для управляющих компонентов конкретных ИИУС производственными процессами возможно использование составных синтаксических конструкций, объединяющих несколько программных операторов, а не отдельные ключевые слова.

5. Уведомление оператора. В данном случае, если автоматические процессы не могут решить проблему, система уведомляет оператора о необходимости вмешательства. Оператор получает информацию о ситуации и инструкции о дальнейших шагах.

6. Ручное вмешательство оператора. При необходимости, оператор исполняет управляющее воздействие для стабилизации работы системы, принимает контроль над процессом и выполняет необходимые действия для устранения проблемы.

7. Мониторинг и повторное обучение. После разрешения исключительной ситуации ИИУС производственным процессом продолжает работу, при этом производится анализ произошедшего исключения для улучшения работы системы в дальнейшем.

Эффективная передача управления между компонентами информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и наноэлектроники при возникновении исключительных ситуаций требует четкой организации процессов, быстрого реагирования на проблемы и взаимодействия различных частей системы для обеспечения безопасности и надежности работы.

Достоинства использования обработки исключительных ситуаций имеет

особенно важное значение при разработке программного обеспечения управляющих компонентов ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, ориентированного на массовое многократное применение. В этом случае при разработке программного обеспечения и компонентов обработки исключительных ситуаций используются универсальные процедуры, В частности, генерация ошибки получения данных с внешних контрольно-измерительных устройств или нехватки оперативной или постоянной памяти. При этом происходит возврат кода ошибки, который последовательно передается между различными обработчиками исключений, пока не найдется подходящий. Недостатком такого способа является усложнение и снижение понятности программного кода компонента обработки исключительных ситуаций. При реализации компонентов обработки исключительных ситуаций следует учитывать особенности языка программирования, версию компилятора и платформу, поскольку версии компиляторов и компиляторы одного языка программирования для различных платформ имеют существенные отличия. Данный факт не позволяет передавать данные об обработке исключительных ситуаций между модулями одного программного обеспечения, написанными на разных языках программирования. Кроме этого, программные библиотеки, реализующие и объединяющие несколько компонентов обработки исключений, не пригодны при смене платформы [225].

В процессе исследования ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники получено, что невозможно реализовать обработку для всех возможных исключительных ситуаций, т.к. некоторые исключения возникают в любом месте программы и предотвратить их нельзя. При этом нецелесообразно указывать подобные исключительные ситуации в описании функции, так как это пришлось бы делать для каждой реализуемой в программном обеспечении функции. Такие исключения классифицируются на «серьезные ошибки» и «ошибки времени выполнения».

Исключительные ситуации, представляющие собой «серьезные

ошибки», не предусмотрены в алгоритмической части программного обеспечения и носят нелинейный характер. Такие ошибки возникают как во внешней среде, так и внутри программного обеспечения. Примером такой ситуации может служить ошибка среды исполнения программы, возможная при выполнении любой команды или оператора.

Исключения времени выполнения связаны с логическими ошибками разработчиков программного обеспечения [225, 226]. В частности, ошибка обращения по неинициализированному указателю, что означает пропуск разработчиком инициализации переменной или выделения динамической памяти для переменной. Как первый, так и второй вариант возникновения исключительной ситуации требует исправления программного кода, а не дополнительной разработки обработчика исключения.

Для управления конкретной ИИУС при моделировании управляющих компонентов следует учитывать среднее квадратичное отклонение значений характеристик объектов от ожидаемых на протяжении всего жизненного цикла процесса, в каждом состоянии, определенном в иерархической структуре ИИУС производственным процессом. Текущее и критическое значение отклонения определяются для каждой конкретной реализации ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники. Значения всех характеристик определяются в нормативной и технической документации конкретной ИИУС производственным процессом. Особую сложность при управлении ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники представляет учет нелинейности процесса: состояние производственной среды, исполнительных механизмов и оборудования, внутренних характеристик, человеческий фактор. Нелинейность процесса усиливает или ослабевает управляющее воздействие, что приводит к снижению значений основных планируемых характеристик процесса. На основе (3.7) и условия перехода ИИУС в состояние с требуемыми характеристиками следует, что для компенсации нелинейности и обеспечения перехода объекта в планируемое состояние необходимо корректировать обеспечивающие и управляющие характеристики системы в текущем

состоянии так, чтобы $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \geq 1$ (рис.4.11).

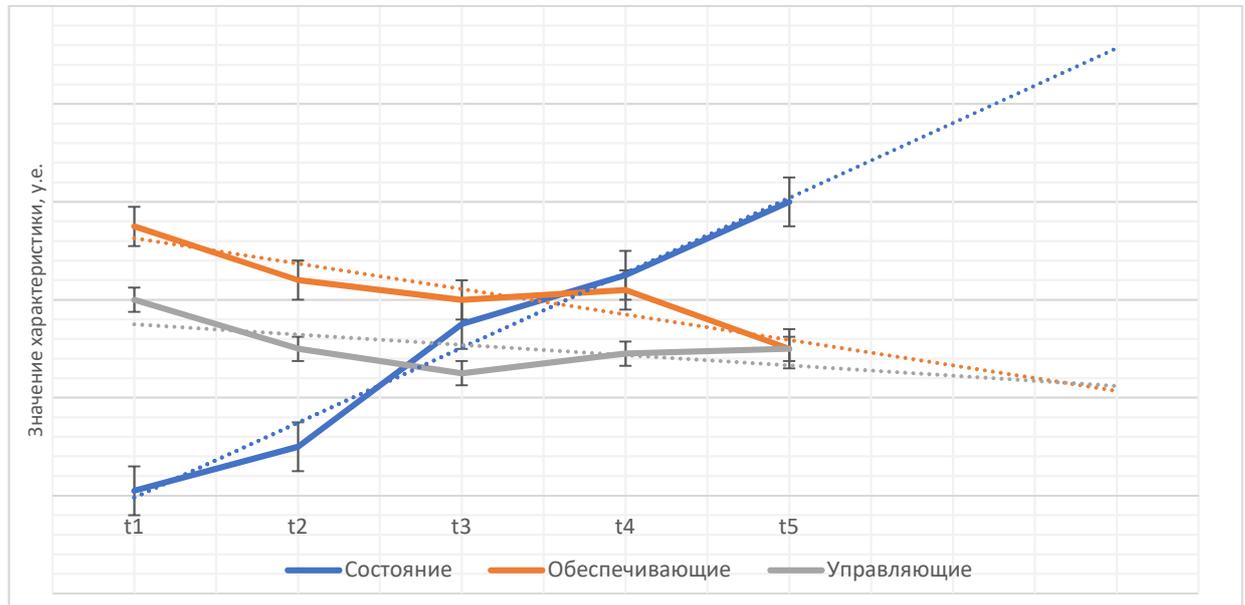


Рис.4.11. Корректирующее воздействие для обеспечивающих и управляющих характеристик

$$N_S^E(t) = f\left(\frac{A_R^E(t)}{A_M^E(t)}\right);$$

$$A_M^E(t) = A_{M\text{план}}^E(t) + \sum_{i=0}^n a_i A_{N1i}(t) + \sum_{i=0}^m b_i A_{N2i}(t) + \sum_{i=0}^k c_i A_{N3i}(t) \quad (4.1)$$

где $A_{M\text{план}}^E$ – планируемое управляющее воздействие, A_{N1} , A_{N2} , A_{N3} – воздействия производственной среды, состояние оборудования и человеческого фактора, a , b , c - весовые коэффициенты нелинейного фактора.

Из (4.1) следует, что чем больше нелинейных факторов и их влияние, тем ниже управляемость и наблюдаемость ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники. Для снижения влияния нелинейности следует использовать закрытые и автоматические системы; датчики, сенсоры и другие контрольно-измерительные приборы для мониторинга состояния нелинейных факторов и своевременного формирования корректирующего воздействия. Это сводится к решению задачи минимизации по нескольким параметрам (4.2). Стоимость s решения r по снижению влияние неопределенности меньше или равной планируемой C . Время анализа и обработки информации

для формирования корректирующего воздействия должно быть меньше общего времени выполнения процесса T .

$$\begin{cases} A_{N1} \rightarrow \min, A_{N2} \rightarrow \min, A_{N3} \rightarrow \min \\ sr \leq C \\ t \leq T \end{cases} \quad (4.2)$$

Решение данной задачи позволит определить количество и тип контрольно-измерительных приборов, тип анализируемой информации и алгоритмы анализа и обработки информации для учета нелинейности при моделировании и построении ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

4.4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Каждая конкретная ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники как по назначению, так и по реализации имеет свою специфику: ограничения и нелинейность. При моделировании и построении ИИУС производственными процессами на основе предложенных в диссертации моделей и алгоритмов важно учитывать эту специфику конкретной ИИУС, что позволит получать модели систем высокой точности (рис.4.12).

Для этого разработана методика моделирования и построения ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, которая заключается в следующем:

1. Выявление в результате онтологического анализа объектов ИИУС, их характеристик и значений, функций, отношений между всеми элементами объекта.
2. Построение иерархической структуры и концептуальной модели ИИУС производственным процессом.
3. Формирование обобщенной математической модели объекта ИИУС

производственным процессом для микро- и нанoeлектроники.

4. Оценка управляемости, наблюдаемости и устойчивости ИИУС производственным процессом.

5. Определение граничных состояний ИИУС, условий их наступления и динамики изменения состояния системы при внешнем управляющем воздействии.

6. Формирование интерфейсов для взаимодействующих компонентов ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники.

7. Определение компонентов, используемых в нескольких ИИУС, их типа взаимодействия и типа создаваемого при взаимодействии системы.

8. Моделирование поведения объектов ИИУС производственными процессами с обработкой исключительных ситуаций, неустойчивых состояний и формирование управляющих воздействий для каждого состояния системы.



Рис.4.12. Методика построения ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники

В результате применения разработанной методики на основе разработанных решений построения ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники разработана обобщенная схема (рис.4.13). Применение методики позволяет учесть специфику конкретной ИИУС производственным процессом: назначение, ограничения, нелинейность.

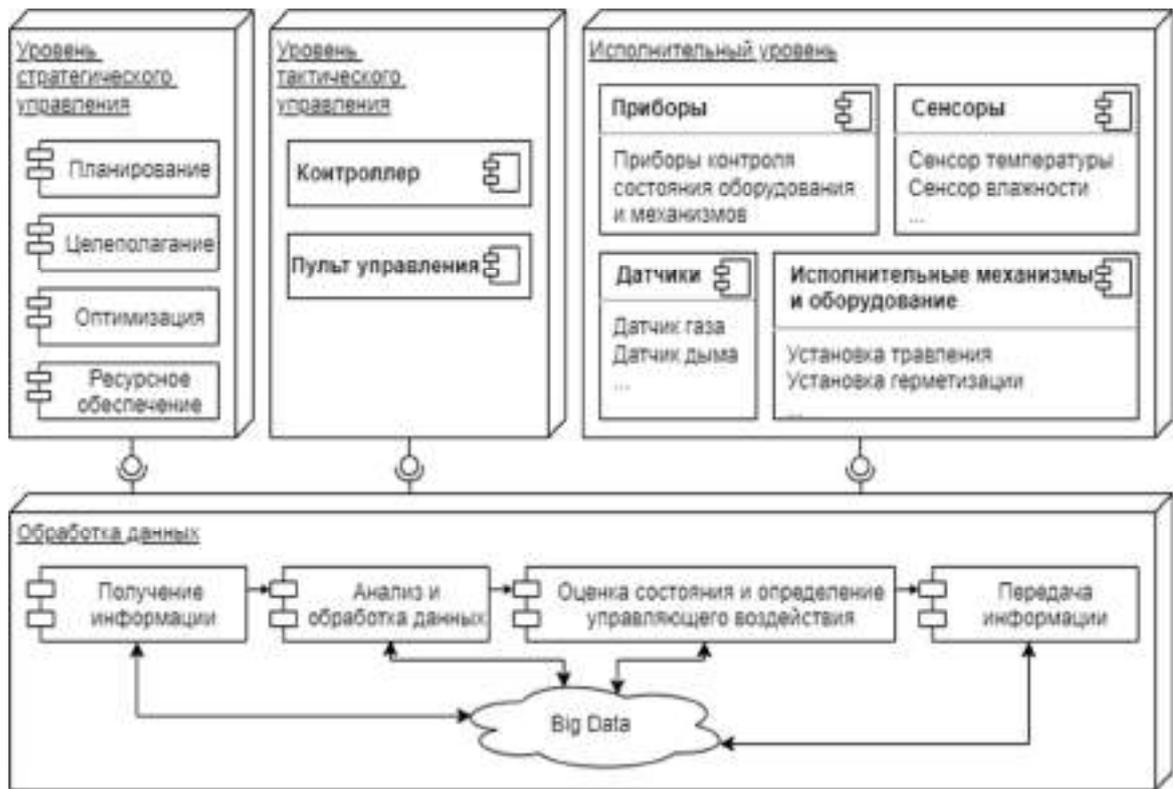


Рис.4.13. Обобщенная схема ИИУС производственным процессом

Полученная обобщенная схема ИИУС производственным процессом учитывает все уровни управления процессом: стратегический, тактический и исполнительный. На каждом уровне определены характерные и используемые на этом уровне компоненты системы. На стратегическом уровне управления преимущественно расположены программные компоненты ИИУС производственным процессом, позволяющие анализировать информацию и формировать управляющие воздействия. На тактическом уровне расположены программно-аппаратные компоненты мониторинга и передачи управляющих воз-

действий на более низкий, исполнительный уровень управления. На исполнительном уровне расположены приборы контроля состояния оборудования и исполнительных устройств, датчики и сенсоры, оценивающие состояние окружающей среды. Обработка данных на обобщенной схеме ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники вынесена в отдельный узел. Для обработки данных используются различные методы, в том числе статистические, методы машинного обучения и нейросетевые алгоритмы. Конкретные методы и способы обработки данных определяются исходя из специфики конкретной ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Выделены и рассмотрены особенности и характеристики взаимодействия объектов ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники. Определены типы взаимодействия объектов ИИУС и типы создаваемых в результате взаимодействия объектов системы.

2. Разработана процессная модель интерфейсов и ролей объектов ИИУС производственными процессами. При разработке моделей и ролей использована объектно-ориентированная парадигма. Для определения типов интерфейсов и кратности отношений между объектами разработана информационная модель ИИУС на основе диаграммы классов UML.

3. Разработаны математические модели поведения объектов ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники в исключительных ситуациях. Полученные модели учитывают выделенные в диссертационной работе типы нелинейности: внешней среды, состояния исполнительных механизмов и оборудования, человеческий фактор. Рассмотрены способы обработки исключительных ситуаций в ИИУС и корректировки управляющих воздействий.

4. Разработана методика построения ИИУС производственными процессами для микро- и нанoeлектроники, позволяющая учитывать специфику конкретной системы: назначение, ограничения и нелинейность. Построена обобщенная схема ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В ВИДЕ СМАРТ-КОМПОНЕНТА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

5.1 РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ СО СМАРТ-КОМПОНЕНТОМ

Управление современным предприятием производства изделий микро- и наноэлектроники представляет собой процесс постоянного обмена информацией между всеми участниками производственной деятельности: производителями, поставщиками, покупателями, сервисными компаниями. Кроме того, современное производство имеет высокую сложность, которая постоянно растет. Это связано с появлением новых технологических решений, новых материалов и оборудования, уменьшением размеров изделий микроэлектроники, повышением требования к точности изготовления продукции и др. Управлять современным производством вручную практически невозможно. Требуется обрабатывать огромное количество данных, поступающих с контрольно-измерительного оборудования, в том числе и в режиме реального времени. Для обработки больших данных требуется новая теоретическая база, основанная на применении различных математических и технологических аппаратов [227-230].

На основании изложенного в главах 1-4 настоящей диссертационной работы следует, что управляемость и устойчивость ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники зависит от точности определения значимых компонентов ИИУС, отношений между и ними, а также от своевременно контроля и корректировки их состояния. Очевидно, возникает задача сбора и обработки данных на всех уровнях управления, анализа полученной

информации с учетом накопленной в процессе эксплуатации ИИУС производственным процессом и формирования управляющего воздействия, приводящего к цели. Для решения данной задачи в диссертационной работе предлагается использовать смарт-компоненты – программные комплексы, включающие характерные для Индустрии 4.0 элементы: анализ больших данных, искусственный интеллект, системную интеграцию, облачные вычисления и др. [231-233].

Разработана архитектура смарт-компонента, состоящего из модулей: сбора и кластеризации данных с устройств ввода; оценки состояния ИИУС производственным процессом методами машинного обучения; управления устойчивостью, предиктивной аналитики; формирования управляющих и контролирующих воздействий, рекомендаций по режиму работы оборудования на основе логического анализа данных; передачи информации; формирования датасетов состояний ИИУС.

В результате применения разработанной методики построения ИИУС получена типовая архитектура ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники со смарт-компонентом (рис.5.1). Применение смарт-компонента позволяет учесть специфику конкретной системы: назначение, ограничения, нелинейность. Для повышения точности оценки состояния ИИУС производственным процессом учтены все ее характеристики и данные о внешней среде.

Обрабатываемая средствами смарт-компонента информация отражает различные производственные, технологические, материальные, учетные параметры. Результаты обработки информации используются в процессе принятия управленческих решений, формирования и корректировки управляющих воздействий в автоматическом режиме, а также для дальнейшего планирования производственной деятельности, в том числе и ее развития.

Информационно-измерительная и управляющая система производственным процессом для микро- и наноэлектроники разрабатывается для каждого предприятия отдельно, с учетом его специфики. ИИУС в зависимости от

размеров предприятия, его целей, выпускаемой продукции и т.п. состоит из одной или нескольких подсистем, каждая из которых отвечает за отдельный производственный подпроцесс. В частности, предприятие выпускающее изделия микроэлектроники имеет ИИУС производственным процессом, состоящую из модулей, отвечающих за оперативное управление производственными процессами и управление качеством выпускаемой продукции, за сбыт и реализацию продукции и материально-техническое обеспечение технологических процессов микро- и наноэлектроники, за учет, подготовку и работу с персоналом, за решение экономических вопросов. На крупных предприятиях ИИУС производственным процессом, как правило имеют дополнительные модули, отвечающие за технико-экономическое планирование, технологическую подготовку и технологический контроль производства.

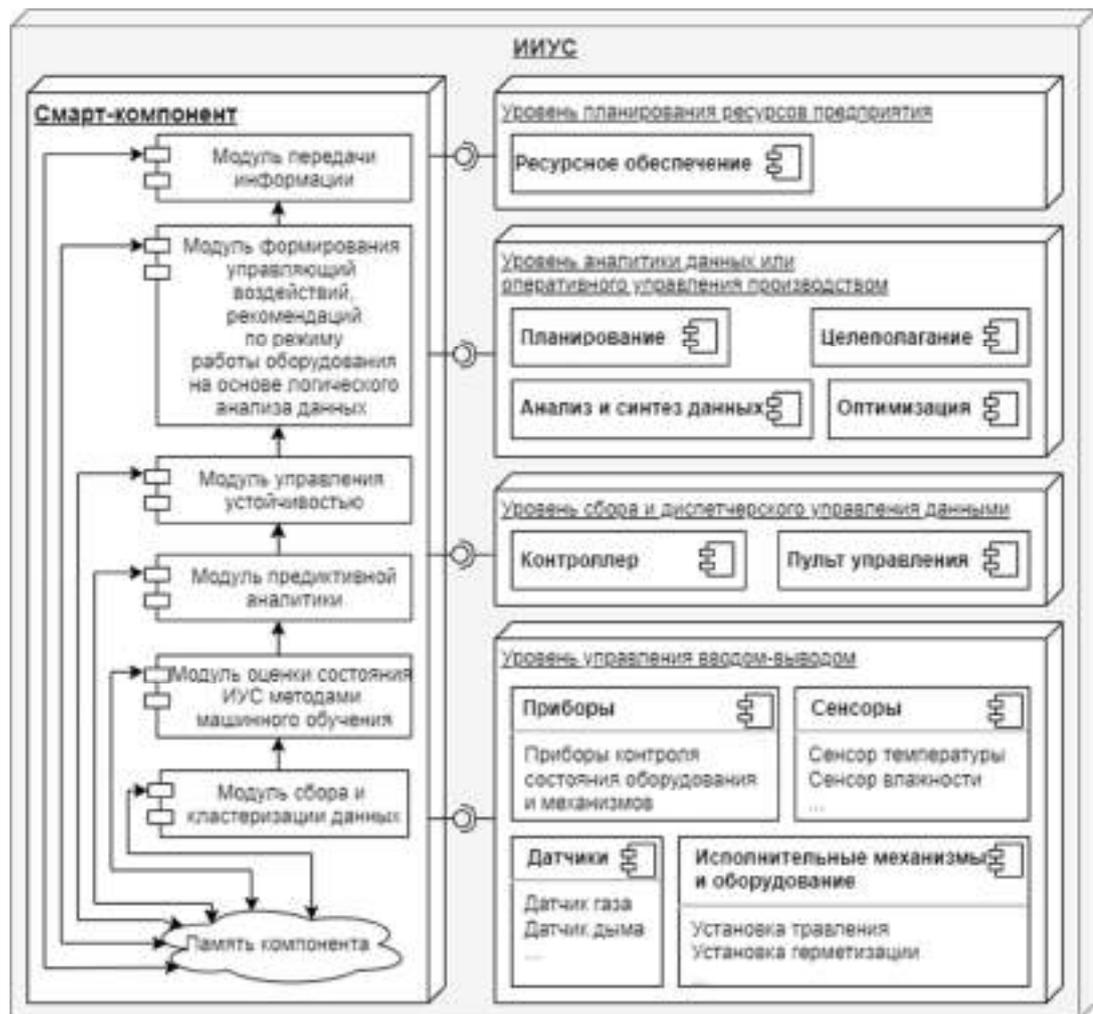


Рис.5.1. Архитектура ИИУС со смарт-компонентом

Использование возможностей смарт-компонентов, которые относятся к саморегулирующимся техническим средствам, для обработки информации о ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники позволит обеспечить эффективное управление всем производственным процессом.

Смарт-компонент – это сложная, состоящая из различных технологий, методов и решений система, позволяющая осуществлять функциональный контроль и управление ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники, что обеспечивает гибкий производственный процесс, в котором возможно производить корректировку управляющего воздействия.

Эффективное использование смарт-компонента обеспечивается его составом, определенным с учетом специфики конкретного ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники с использованием разработанной методики моделирования и построения ИИУС. Являясь достаточно сложной системой, смарт-компонент состоит из более мелких подсистем, основной целью которых является повышение эффективности принимаемых управленческих решений, которые способствуют решению основных задач ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники – преобразование сырья в качественное готовое изделие.

Смарт-компонент состоит из функциональных и обеспечивающих подсистем или модулей. Смарт-компонент сложен в управлении, поскольку состоит из большого количества разнообразных связанных между собой элементов. В процессе обработки информации смарт-компонент предоставляет операторам сведения о ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники в виде диаграмм, графиков, схем или другом цифровом формате, - все это предназначено для управления ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники и принятия мер для разрешения сложившихся ситуаций на основе предлагаемых решений и рекомендаций.

На определенном этапе любой производственной деятельности возникает вопрос об увеличении мощности, скорости линии или количестве выпус-

каемых изделий. Как правило, для этого необходимо дополнительно автоматизировать процессы и обновить аппаратные составляющие производственного процесса, а в некоторых случаях, произвести полное усовершенствование систем всех уровней.

Использование смарт-компонентов для ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники позволит повысить управляемость системы. Повышение управляемости ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники имеет решающее значение для обеспечения качества и эффективности производства в этой отрасли. В связи с малыми масштабами и высокой чувствительностью технологических процессов в микро- и наноэлектронике, необходимо обеспечить высокую точность измерений параметров производственного процесса. При этом должна обеспечиваться быстрая обратная связь между измерениями и управляющими действиями для коррекции процесса в реальном времени. Целесообразно, для повышения управляемости системы использовать передовые технологии, такие как нейронные сети, машинное обучение, искусственный интеллект и т.д. Важным аспектом является непрерывный мониторинг процесса и анализ данных для выявления аномалий, определения оптимальных параметров и принятия решений на основе данных. Кроме того, ИИУС должна быть интегрирована с другими производственными системами для обеспечения эффективного взаимодействия и синхронизации процессов. Система должна быть гибкой и настраиваемой для адаптации к изменяющимся условиям производства и требованиям. Важно обеспечивать безопасность данных, так как информация о производственных процессах в микро- и наноэлектронике является во многих случаях конфиденциальной и критической. Применение автоматизированных систем контроля и управления позволяет повысить эффективность процессов и снизить вероятность человеческих ошибок, а также другие нелинейные факторы и неопределенности. Управление информационно-измерительной и управляющей системой в производстве для микро- и наноэлектроники требует комплексного под-

хода, инновационных технологий и постоянного совершенствования для обеспечения высокой производительности и качества продукции.

Включение в состав смарт-компонента гибкого технологического модуля, состоящего из оборудования с числовым программным управлением; роботизированными конструкциями, управляющими перемещением производственных объектов; измеряющих и контролирующих процесс датчиков; производящих определение причин сбоев и неисправностей в работе оборудования; восстанавливающих функциональность компонентов; собирающих и удаляющих остатки производственной деятельности компонентов, - позволяет повысить адаптируемость ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники к изменению производственных параметров. Повышение адаптивности информационно-измерительной и управляющей системы заключается в ее способности эффективно реагировать на изменения внешних условий и требований, а также быстро адаптироваться к новым ситуациям. Система должна быстро изменять свою конфигурацию и параметры работы в соответствии с новыми требованиями или условиями производства. Данное требование подразумевает под собой возможность изменения настроек измерительных приборов, параметров управления, алгоритмов обработки данных и т.д. ИИУС должны иметь возможность самостоятельно адаптироваться к изменениям в процессе производства. Например, использовать алгоритмы машинного обучения для анализа данных и определения оптимальных параметров управления на основе полученной информации. ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники должна иметь механизмы обратной связи, позволяющие ей получать информацию о текущем состоянии процесса и корректировать свои действия в режиме реального времени. Например, если измерения показывают отклонение от желаемых значений, система должна автоматически вносить коррекции в управляющие сигналы. При этом важно автоматически определять оптимальные параметры управления на основе анализа данных и моделирования процесса. Это позволяет достаточно быстро

адаптироваться к изменяющимся условиям и достигать требуемой производительности. Важным аспектом повышения адаптивности является интеграция информационно-измерительной и управляющей системы с другими системами производства. Это позволяет обмениваться данными и информацией между различными системами, что способствует более гибкому и адаптивному управлению процессом. Кроме того, ИИУС должна непрерывно мониторить процесс, собирать данные и проводить анализ для выявления аномалий и изменений. Это позволяет оперативно реагировать на изменения и принимать соответствующие меры. Таким образом, повышение адаптивности информационно-измерительной и управляющей системы требует использования передовых технологий, таких как искусственный интеллект, машинное обучение и автоматизация, а также постоянного мониторинга и оптимизации процесса.

Применение числового программируемого управления позволяет контролировать исполнительные устройства и оборудование, контрольно-измерительные приборы; обеспечивать программно-перенастраиваемые работы, способствующие получению качественного конечного результата на каждом этапе работы ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники.

При формировании моделей и архитектуры смарт-компонента конкретного ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники следует учитывать структурно-организационные признаки процесса:

- поведение ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники соответствует построенной иерархической структуре системы, но имеется возможность внесения изменений в очередность применения оборудования;

- определенная в иерархической структуре ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники очередность использования технологического оборудования полностью соответствует осуществляемым в процессе технологическим процедурам;

- конструкция готового изделия в некоторых ситуациях отличается от

ожидаемой, но при этом сама функциональность изделия остается неизменной;

- использование методов энергосберегающего производства с учетом обеспечения эффективного, быстрого и качественного производства изделий микроэлектроники.

Смарт-компонент для сложных производственных процессов содержит несколько гибких технологических модулей, способных работать автономно на протяжении длительного времени и встраиваемых на любой уровень управления производством. При этом процесс функционирования смарт-компонента с несколькими гибкими технологическими модулями состоит из нескольких этапов, из которых основными являются:

- проектирование. Учитываются параметры готовых изделий микроэлектроники, состояние оборудования, планы производства. В результате производятся расчеты себестоимости и производительности.

- планирование. Рассчитываются параметры производственного процесса с технологической точки зрения, позволяющие максимально эффективно использовать доступные ресурсы и получать качественную продукцию.

- организация контроля и управления работоспособностью и состоянием производственной среды, исполнительных механизмов и оборудования, контрольно-измерительных приборов, состояния коллектива.

В случае отклонения характеристик ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники от рассчитанных программные модули смарт-компонента определяют допустимое корректирующее воздействие, производится запуск системы регулирования ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники, в результате которого система вернется в расчетное состояние.

При использовании для управления ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники смарт-компонентов каждый этап производства тщательно контролируется, при необходимости корректируется и поддер-

живается в пределах допустимых значений, определенных нормативными документами.

Все ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники характеризуются параметрами, количество которых, как для отдельной ИИУС, так и для совокупности систем может быть достаточно большое. Анализ параметров ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники как отдельных, так и в совокупности, позволяет получить оценку состояния системы, управлять системой, прогнозировать динамику поведения системы, принимать административные решения, а также решения по работе исполнительных механизмов и оборудования. Программные модули, входящие в состав смарт-компонента, позволяют на основе анализа значений производственных параметров формировать различные отчеты и документацию [231-234]. Большое значение на анализ производственных параметров и принимаемые управленческие и корректирующие решения имеет оперативность и форма получения информации с контрольно-измерительных устройств, используемых в ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники.

С учетом всего вышеизложенного, для разработана типовая модель смарт-компонента, состоящая из модулей сбора данных с устройств ввода; анализа и обработки полученных данных; предоставления информации о состоянии ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники, формировании управляющих и контролирующих воздействий, рекомендаций по оптимальному режиму работы оборудования; передачи информации в ИИУС (см.рис.5.1).

Модель смарт-компонента основана на разработанных алгоритмах анализа и прогнозирования изменения состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники и принятия решения. Для повышения точности оценки состояния важно учесть все характеристики производства и данные о внешней среде, а также их совокупность.

5.2 ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Для анализа и обработки данных о производстве и внешних факторов используются методы машинного обучения, в частности, логический анализ данных [235-237]. Логический анализ данных - это процесс применения логических методов и правил к данным с целью выявления закономерностей, паттернов и вывода информации из имеющихся фактов. Логический анализ данных включает в себя интерпретацию информации, содержащейся в наборе данных, с использованием логических методов и правил. Основной целью логического анализа данных является выявление скрытых закономерностей, тенденций и связей между различными переменными или атрибутами данных. На основе полученных результатов логического анализа данных можно строить логические модели, которые описывают взаимосвязи между данными и помогают делать прогнозы или принимать решения. Логический анализ данных также помогает выявлять аномалии или необычные паттерны в данных, что может быть важно для обнаружения ошибок или проблем в исследуемом процессе. Результаты логического анализа данных могут быть использованы для принятия решений, оптимизации процессов или предоставления рекомендаций на основе логических выводов. В рамках логического анализа данных могут применяться различные методы логики, такие как индуктивное и дедуктивное мышление, логический вывод, правила ассоциации и другие. Логический анализ данных играет важную роль в понимании информации, содержащейся в наборах данных, и помогает извлекать ценные знания из этих данных для принятия обоснованных решений.

Использование этого метода в предлагаемом смарт-компоненте позволяет получить закономерности и классификаторы, учитывающие все характеристики ИИУС производственным процессом и внешнего воздействия [235]. Как правило, состояние ИИУС производственным процессом характеризуется

неполными и неточными данными. Неполные данные содержат отсутствующие значения для определенных переменных или атрибутов, что, как правило, вызвано ошибками в сборе данных, недоступностью информации или пропусками. Фрагментарность неполных данных затрудняет полное понимание контекста или ситуации. При этом данные могут быть неполными из-за различий в структурах или форматах данных, что затрудняет их сравнение или объединение. Неточные данные содержат ошибки, опечатки, некорректные значения или неточности, противоречия или несоответствия между различными источниками данных или переменными, которые искажают реальное положение вещей. Работа с неполными и неточными данными требует специальных методов и подходов, таких как очистка данных, заполнение пропущенных значений, проверка на аномалии и использование статистических методов для коррекции ошибок. Важно учитывать эти аспекты при анализе данных, чтобы избежать искажений и ошибочных выводов. При оценке состояния ИИУС в этом случае для построения классификаторов следует использовать закономерности с частичным покрытием классификационного признака. При этом следует заранее определить ограничения и погрешности на покрытие признака.

При исследовании реальных ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники кроме вопросов, связанных с классификацией и интерпретируемостью полученных результатов и обоснованностью предлагаемых решений, встают вопросы получения комплексной оценки состояния ИИУС с учетом значений всех ее характеристик и их совокупностей. Точность оценки состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники позволит повысить точность прогноза ее поведения и получить интерпретируемые результаты для составления рекомендаций и принятия решений. Для этого важно учесть не только все возможные значения характеристик ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники, но и логические связи между ними. Эффективным методом анализа данных с целью выделения логических связей и их классификации является логический анализ данных.

Логический анализ данных предполагает последовательный перебор данных с целью выявления закономерностей и учета связей между ними. Данный метод предполагает две техники перебора данных: «снизу вверх», при котором предполагается поиск допустимых закономерностей за счет добавления к ним литералов покрытия, и «сверху вниз», в котором происходит исключение литералов закономерностей для повышения значения покрытия. При дальнейшем развитии метода логического анализа данных задача поиска закономерностей определена как условная псевдоболевая оптимизация. При этом поиск закономерностей сводится к поиску закономерностей с наибольшим покрытием при условии недопустимости или ограниченной допустимости покрытия экспериментальных наблюдений другого класса. Наиболее часто для решения обозначенной условной псевдоболевой оптимизации используется жадный алгоритм или нелинейная аппроксимация целевой псевдоболевой функции со сведением к задаче целочисленного линейного программирования, решение которой является приближенным решением исходной задачи.

В процессе исследования возможности использования логического анализа данных с решением задачи условной псевдоболевой оптимизации для оценки состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники получено, что подобный подход не обеспечивает формирование закономерностей, доказательно определяющих состояние ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники и динамику его изменения. Для точного и интерпретируемого определения состояния ИИУС требуются доказательные закономерности, а также удовлетворяющие требованиям простоты и избирательности. В связи с этим для точного определения состояния и изменения его динамики требуется усовершенствование методов решения задачи поиска закономерностей и формирования классификаторов.

Одной из основных проблем логического анализа данных при оценке состояния нелинейной системы и прогнозе его изменения является построение закономерностей и классификаторов, на основе которых принимается решение или строятся выводы. Для поиска закономерностей в логическом анализе

данных используются ассоциативные правила, позволяющие учитывать связи между событиями или объектами. Принято выделять три вида правил:

- полезные правила, позволяющие выделять действительную информацию, которая неизвестна, но имеет некоторое логическое объяснение;
- тривиальные правила, позволяющие выделять действительную информацию, отражающие известные законы в исследуемой предметной области;
- непонятные правила, позволяет получить действительную информацию, которая не имеет объяснения. Это обусловлено аномальными исходными данными, глубоким покрытием закономерностей и для интерпретации полученных правил требуется дополнительный анализ.

В настоящее время существует несколько способов, в которых используются обозначенные ассоциативные правила [238, 239]. Например, алгоритмы AQ (Algorithm for synthesis of quasi-minimal covers, Michalski), работа которых заключается в последовательной обработке и исключении уже рассмотренных покрытых закономерностей экспериментальных наблюдений и поиске следующей закономерности из оставшихся обучающих наблюдений. В подобных алгоритмах для построения классификаторов используется эвристические процедуры, что позволяет формировать классификаторы с высокой скоростью, что, несомненно, является преимуществом. К недостаткам алгоритмов AQ относится низкая информативность полученных закономерностей и классификаторов, связанная с тем, что все закономерности, за исключением первой, строятся на анализе оставшегося множества наблюдений. В связи с этим алгоритмы данного типа не эффективны при использовании для оценки состояния ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники, поскольку не учитывают все возможные состояния, значения производственных параметров, связи и зависимости между ними.

Исходя из изложенного в Главе 1 настоящей диссертационной работы, ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники является нелинейной детерминированной динамической системой. Состояние нелинейной детерминированной системы определяется значениями ее характеристик

в конкретный момент времени. В соответствие с разработанной обобщенной математической моделью состояния ИИУС определяется как:

$$E_S = \langle (a_{1i}, v_{1i}), \dots, (a_{ni}, v_{ni}) \rangle \quad (5.1)$$

где (a_{ij}, v_{ij}) – упорядоченная пара характеристики и ее значения.

Закономерность или логическое правило является конъюнкцией значений характеристик, описывающих нелинейную систему. Классификатор представляет собой совокупность закономерностей, достаточно представляющих поведение нелинейной системы.

Основным этапом предлагаемого метода оценки состояния ИИУС производственным процессом является последовательный поиск однородных закономерностей, сводящийся к многокритериальной оптимизационной задаче. Решением задачи является закономерность, покрывающая наибольшее число наблюдений по одному признаку при отсутствии покрытий наблюдений по другому признаку. Рекуррентная организация поиска позволит определять закономерности как по отдельным признакам, так и по их совокупности, представленной в виде n -мерного вектора. Такой подход позволяет повысить точность определения закономерностей и классификаторов, их информативность (качество логического правила), интерпретируемость и обобщенность. Редукция закономерностей в данном подходе основана на рекуррентной конъюнкции получаемых классификаторов [240, 241].

Для поиска закономерностей в различных состояниях ИИУС производственным процессом по одному признаку рассмотрим выборку данных из непересекающихся множеств наблюдений положительного класса K^+ (состояние соответствует выделенному признаку) и отрицательного класса K^- (состояние не соответствует выделенному признаку) характеристик системы в виде n -мерных векторов (рис.5.2). Для наглядности объекты представляются бинарными признаками $x_i^j \in \{0,1\} \forall i, j$.

При такой формализации данных закономерностью является предикат $\varphi: H \rightarrow \{0,1\}$ на множестве наблюдений H , покрывающий наблюдения одного

класса и не покрывающий наблюдения другого с учетом погрешности.

$$\varphi(h) = \begin{cases} 1, \text{наблюдение } h \text{ покрывается} \\ 0, \text{наблюдение } h \text{ не покрывается} \end{cases} \quad (5.2)$$

Пусть Z_k число наблюдений положительного класса K^+ в выборке H^l , где $Z_k > 1, Z_k + M_k = l$, тогда $z_k(\varphi)$ число наблюдений, для которых выполняется условие $\varphi(h) = 1$. M_k число наблюдений всех остальных классов в выборке H^l , $M_k > 1$. $m_k(\varphi)$ число наблюдений из M_k , для которых выполняется условие $\varphi(h) = 1$.

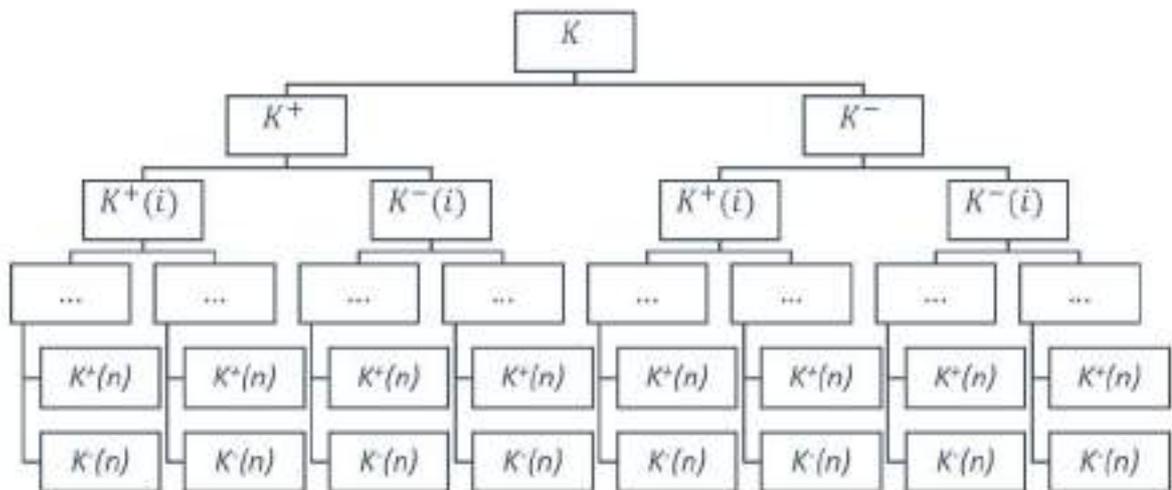


Рис.5.2. Множество наблюдений по различным признакам

Таким образом, задача поиска информативной закономерности состоит в оптимизации по двум критериям $z_k(\varphi) \rightarrow \max$ и $m_k(\varphi) \rightarrow \min$ (рис.5.3.). Погрешность поиска определяется достаточным для классификации количеством покрываемых наблюдений. Классификация не выполняется для закономерностей, покрывающих недостаточное количество наблюдений и для закономерностей, покрывающих количество наблюдений, близкое к значению погрешности.

Следовательно, доля положительных покрываемых наблюдений F_k и доля отрицательных E_k среди всех покрываемых наблюдений равны:

$$F_k(\varphi, H^l) = \frac{z_k(\varphi)}{z_k(\varphi) + m_k(\varphi)}; E_k(\varphi, H^l) = \frac{m_k(\varphi)}{z_k(\varphi) + m_k(\varphi)} \quad (5.3)$$

Закономерность информативна, если $F_k(\varphi, H^l) \geq \delta$ и $E_k(\varphi, H^l) \leq \varepsilon$ при достаточно большом значении δ и достаточно малом ε из отрезка $[0,1]$.

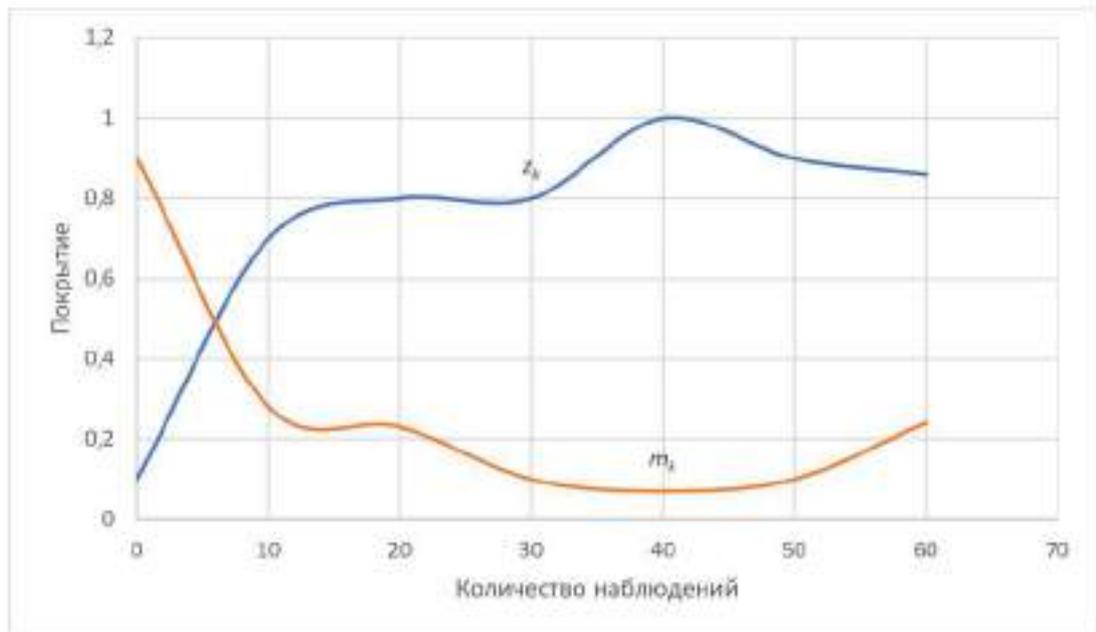


Рис.5.3. Закономерности для исследуемого класса наблюдений

Полученные таким образом закономерности объединяются в классификаторы с максимальной интерпретируемостью и обобщенностью. Докажем это. Для доказательства рассмотрим оптимизационные модели положительных закономерностей, для отрицательных закономерностей рассуждения аналогичны.

Положительная γ -закономерность для $\gamma \in \{0,1\}^t$ – это закономерность, построенная на основе наблюдения γ . Для каждого наблюдения формируется максимально информативная γ -закономерность. Введем бинарную переменную $P = (p_1, p_2, \dots, p_t)$ для описания информативности закономерности.

$$p_k = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й признак в закономерности} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (5.4)$$

Для закономерностей, полностью покрывающих наблюдение, $m_k(\varphi) = 0$. Следовательно, для каждого наблюдения отрицательного класса $\mu \in K^-$ бинарная переменная $p_k = 1$ хотя бы для одного $k: \mu_k \neq \gamma_k$.

$$\sum_{\substack{k=1 \\ \mu_k \neq \gamma_k}}^t p_k \geq 1 \forall \mu \in K^- \quad (5.5)$$

Кроме этого, значение бинарной переменной $p_k = 0$ для k , не определенных в γ -закономерности, покрывающей наблюдение положительного класса $\omega \in K^+$. Тогда целевая функция оптимизационной модели представляет суммарное количество наблюдений положительного класса, покрываемых γ -закономерностью.

$$\sum_{\omega \in K^+} \prod_{\substack{j=1 \\ \omega_k \neq \gamma_k}}^t (1 - p_k) \quad (5.6)$$

Оптимизационная модель для поиска закономерностей с учетом условий оптимизации

$$\sum_{\omega \in K^+} \prod_{\substack{j=1 \\ \omega_k \neq \gamma_k}}^t (1 - p_k) \rightarrow \max; \sum_{\substack{k=1 \\ \mu_k \neq \gamma_k}}^t p_k \geq 1 \forall \mu \in K^-, p \in \{0,1\}^t \quad (5.7)$$

Такая модель позволит получать полностью покрывающие наблюдение закономерности с $m_k(\varphi) = 0$ и формировать из них классификаторы с максимальной интерпретируемостью и обобщенностью. Что и требовалось доказать.

Поскольку состояния ИИУС производственным процессом для микро- и нанoeлектроники определяется неполными и неточными данными, то в таких случаях для построения классификаторов и оценки состояния системы следует использовать закономерности с частичным покрытием наблюдений с $m_k(\varphi) > 0$. Функция ограничения модели оптимизации примет вид:

$$\sum_{\mu \in K^-} y_\mu \leq S, \text{ где } y_\mu = \begin{cases} 0, & \text{если } \sum_{\substack{j=1 \\ \mu_k \neq \gamma_k}}^t p_k \geq 1 \\ 1, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (5.8)$$

S – число наблюдений противоположного класса.

С учетом функции ограничения и полученной ранее оптимизационной модели получим закономерности с небольшой степенью и максимальным покрытием, для которых $m_k(\varphi) > 0$. Увеличение $m_k(\varphi)$ приводит к снижению информативности формируемых закономерностей. Решить эту проблему позволяет максимальное увеличение степени уже сформированных закономерностей при сохранении количества покрываемых наблюдений своего класса.

$$\sum_{k=1}^f p_k \rightarrow \max, r(P) = r'(P) \quad (5.9)$$

Где $r(P)$ – покрытие наблюдений своего класса для закономерности до применения процедуры увеличения степени, $r'(P)$ – покрытие наблюдений своего класса для закономерностей после процедуры увеличения степени.

В результате применения процедуры увеличения степени закономерностей для неполных и неточных данных получается классификатор, состоящий из логических правил с максимальным покрытием и степенью выше исходной. Обобщающая способность полученного классификатора выше исходной, что связано с сокращением значения $m_k(\varphi)$.

Редукция построенного классификатора производится на основе рекуррентной конъюнкции закономерностей с учетом погрешностей δ и ε . Закономерности, для которых $E_k(\varphi, H^l) > \varepsilon$ удаляются из классификатора. Закономерности, для которых значение S_k ниже, чем у оставшихся в классификаторе, также удаляются (рис.5.4). Таким образом, редукция классификатора заключается в:

- 1) определение значения S_k для каждой закономерности в исходном классификаторе;
- 2) сортировка закономерностей в порядке убывания значения S_k для каждого класса;
- 3) удаление закономерностей из классификатора с учетом погрешности и формирование из оставшихся новых классификаторов;
- 4) проверка оптимальности классификатора. Увеличение количества непокрытых наблюдений множества данных свидетельствует о недостаточности закономерностей в классификаторе.

Высокая точность классификации при редукции путем рекуррентной конъюнкции закономерностей обусловлена уменьшением среднего значения показателя $m_k(\varphi)$ и увеличением среднего значения показателя $z_k(\varphi)$ для набора закономерностей каждого класса. Повышение интерпретируемости классификатора происходит за счет редукции, критерием остановки которой

является увеличение количества непокрытых наблюдений множества данных.



Рис.5.4. Редукция классификатора

Для повышения точности оценки состояния нелинейной системы предлагается для каждой закономерности из полученных классификаторов определять весовой коэффициент a_i . Физический смысл которого заключается в воздействии выбранной закономерности при ее наступлении на общее состояние нелинейной системы.

$$a_i = \frac{N_i}{M} \quad (5.10)$$

N_i – количество совпадений выделенной закономерности в классификаторах, M – общее количество классификаторов.

Коэффициент принимает значение от 0 до 1. 1 – наиболее значимая закономерность при оценке состояния нелинейной системы, 0 – закономерность не имеет значение для определения состояния системы.

После определения весовых коэффициентов для каждой закономерности строится граф связности $D = (V, E)$ для классификаторов, в котором вершинами V будут являться закономерности, а ребрами $E = (u, v): u, v \in V$ – связи между ними, вес ребра – равен значению весовому коэффициенту закономерности (рис.5.5). Граф, где – вершины, соответствующие объектам представляемой системы. – упорядоченная пара вершин (дуга).

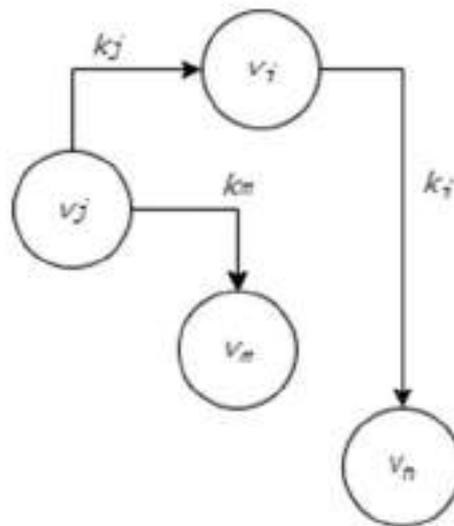


Рис.5.5. Граф связности для классификатора

Далее строится аналогичный по структуре граф связности $D' = (V, E)$ критериев оценки состояния нелинейной системы. С учетом положений нечеткой логики происходит сравнение вершин двух графов (рис.5.6).

$$V \subset V' \Leftrightarrow \forall v \in V: \mu_V(v) \leq \mu_{V'}(v) \quad (5.11)$$

$$I(V \subset V') = \min_{v \in T} \mu_{V'}(v) : T = \{v \in V; \mu_V(v) \leq \mu_{V'}(v); \mu_V(v) > 0\} \quad (5.12)$$

В случае положительного сравнения закономерности и соответствующего ему критерия происходит маркирование узла графа классификаторов. Далее рассчитывается путь между маркированными узлами, который используется при расчете комплексной оценки состояния нелинейной системы. Если $e_{i,j}$ – ребро, соединяющее две вершины v_i и v_j и весовая функция $f: E \rightarrow \mathbb{R}$, тогда путь G между маркированными узлами рассчитывается как

$$G = \sum_{i=1}^{n-1} f(e_i, e_{i+1}) \quad (5.13)$$

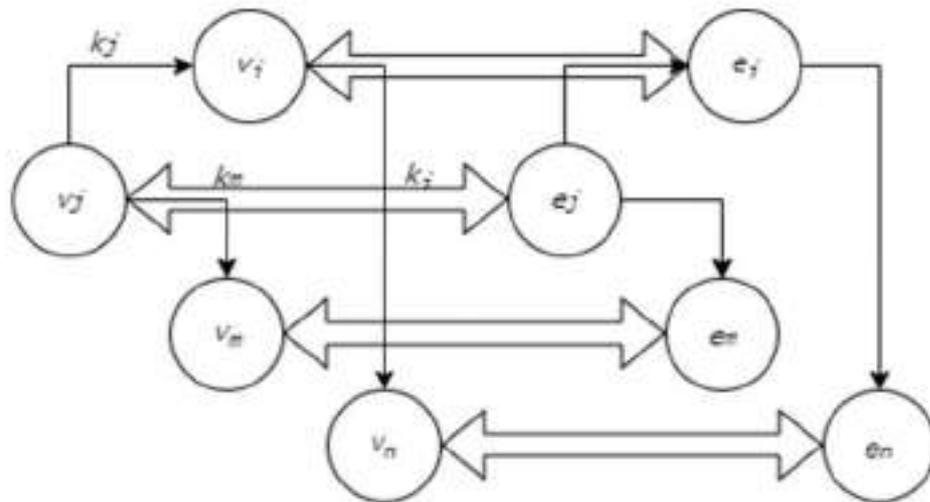


Рис.5.6. Сравнение графов связанности классификаторов и критериев состояния

Особенность метода заключается в поочередном сравнении закономерностей с учетом их значимости и соответствующих им критериев, что позволяет уменьшить нечеткость сравниваемых множеств.

Значение комплексной оценки состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники находится в диапазоне от 0 до 1. При необходимости данный диапазон может быть разделен на конечное число диапазонов, каждому из которых ставится в соответствие набор рекомендаций, решений или действий для исследуемой системы.

Предложенный метод к определению состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники использован при разработке и моделировании смарт-компонентов, входящих в состав ИИУС. Метод позволяет получить точную оценку состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники, что повышает точность прогноза, рекомендаций и принимаемых решений. В процессе построения закономерностей и формирования классификаторов для оценки состояния ИИУС производственным

процессом для микро- и нанoeлектроники учитываются все возможные характеристики системы, их совокупности и связи между ними. Редукция закономерностей в данном методе основана на рекуррентной конъюнкции получаемых классификаторов, что позволяет повысить их интерпретируемость и обобщенность.

5.3 АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК РЕШЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В настоящее время с учетом возрастающих требований к производственному процессу в микро- и нанoeлектроники контроль и управление состоянием производственной среды являются критически важными аспектами для обеспечения безопасности, эффективности и устойчивости производственных процессов. В современном мире, где растет конкуренция, повышаются требования к экологической устойчивости и безопасности производства, а также увеличивается сложность технологических процессов, контроль и управление состоянием производственной среды становятся более актуальными чем когда-либо [242, 243].

Обеспечение безопасности работников, оборудования и окружающей среды является приоритетной задачей для любого предприятия. Контроль производственной среды помогает предотвратить аварии, уменьшить риск травм и минимизировать воздействие на окружающую среду. Кроме того, управление состоянием производственной среды позволяет оптимизировать использование ресурсов, повысить производительность оборудования и процессов, а также сократить издержки. Контролирование состояния производственной среды позволяет предотвращать возможные проблемы в работе оборудования, что способствует устойчивости производственных процессов и предотвращает простои [244].

Целесообразно использовать для этой цели отдельный модуль, входящий в состав смарт-компонента ИИУС производственным процессом. Использование смарт-компонента позволяет не только управлять параметрами производственной среды, но и накапливать результаты наблюдения для последующего анализа и прогнозирования изменений, что особенно важно при принятии управляющих решений и планировании производства [245].

Существующие решения контроля состояния производственной среды, как правило, не учитывают зависимость параметров, например, при изменении влажности помещения меняется температура и наоборот. Кроме того, многие решения в режиме информирования, т.е. выдают сообщение об изменении какого-либо параметра или превышении пороговых значений, что в дальнейшем требуют участия оператора для формирования и выполнения управляющего воздействия, что, в свою очередь, может приводить к браку, нарушению техники безопасности, несоблюдения внешних условий производства и его остановки. Все это является причиной проблемной ситуации, состоящей в отсутствии способов контроля и управления состоянием производственной среды в автоматическом режиме с высокой точностью и с учетом нелинейных взаимозависимостей между параметрами [246, 247].

Управляемый параметр – параметр производственной среды, который может быть изменен в режиме реального времени наиболее доступным способом.

Наиболее эффективным решением для смарт-компонента ИИУС производственным процессом является выбор такой схемы управления, при которой значение управляемого параметра изменяется на основе результатов прогнозирования с учетом изменяющихся внешних параметров. Таким образом, кроме задачи автоматического выдерживания значения управляемого параметра накладывается дополнительная задача автоматического составления программы управления в зависимости от внешних параметров. В настоящее время для решения данной задачи широкое распространение получило применение нейронных сетей [248, 249].

Для этого в замкнутый контур управления поместим устройство автоматического поиска решения с программным обеспечением на основе нейронных сетей (рис.5.7). Данное устройство производит анализ множества параметров производственной среды и подает в устройство управления требуемое значение управляемого параметра x_0 , так, чтобы параметр производственной среды $z_i(x_0)$ получил допустимое среднее значение (между минимально и максимально допустимыми значениями). Например, параметр $z_i(x_0)$ может быть влажностью помещения, величиной расхода материалов и т.п. Тогда устройство автоматического поиска решения выдает такое требуемое значение управляемого параметра x_0 , которое дает, соответственно, среднее значение допустимой влажности помещения или величину среднего допустимого расхода материала.

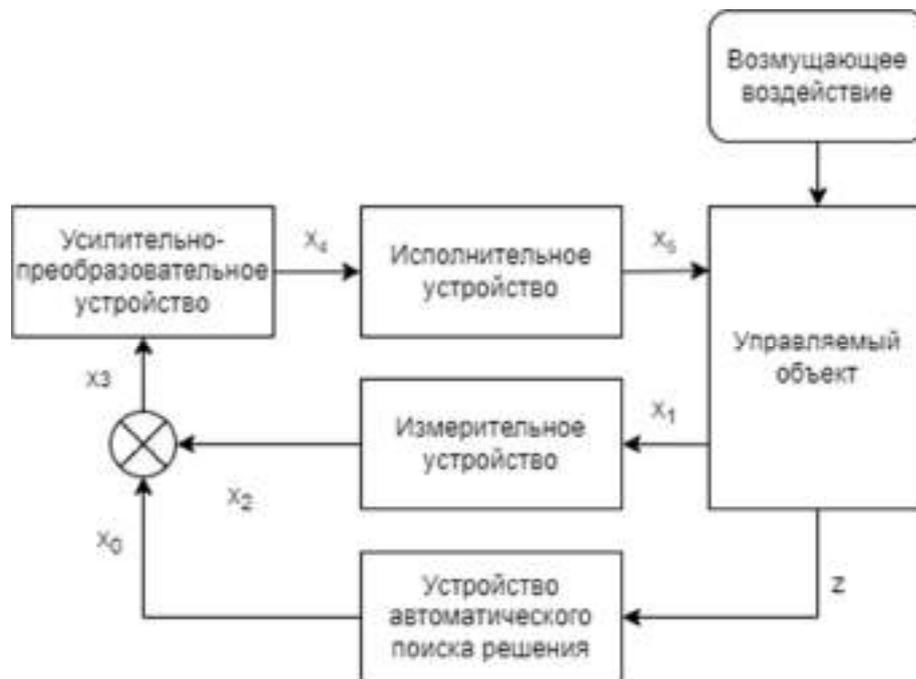


Рис.5.7. Схема контура управления состоянием производственной среды

При этом как сама величина допустимого среднего значения параметра z_i , так и соответствующее ему значение x_0 могут существенно меняться в за-

висимости от внешних условий работы управляемого объекта. Устройство автоматического поиска решений должно всегда находить допустимое среднее независимо от причин, вызывающих его смещение в процессе работы управляемого объекта.

При построении описанного выше контура управления функции автоматического поиска x_0 и измерения фактического значения x_1 управляемого параметра разделены. Однако, в некоторых случаях возможно объединение данных функций в одном приборе, в результате чего устройство автоматического поиска решений выдает не x_0 , а непосредственно разностный сигнал на усилитель x_3 , пропорциональный отклонению фактического значения регулируемой величины от требуемого для обеспечения экстремума того или иного параметра производственной среды.

Принципы действия устройства автоматического поиска решений в ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники заключается в анализе измеренных значений параметров производственной среды, прогнозирование изменения значения управляемого параметра, анализ данного изменения и формирование управляющего воздействия для корректировки значения управляемого параметра.

В настоящее время модели искусственных нейронных сетей широко используются в информационно-измерительных и управляющих системах. Управление осуществляется на основе прогнозного значения регулируемых параметров. Известно, что при произвольно выбранных начальных весах и смещениях нейронная сеть не может получить требуемый результат с достаточной точностью. Для этого в процессе обучения веса и смещения постоянно изменяются таким образом, чтобы разница между данными на выходе и итоговым значением была небольшой. Для реализации автоматического поиска решений в ИИУС производственным процессом для нахождения оптимальных начальных весов нейронной сети предлагается использовать алгоритм гармо-

нического поиска, относящийся к метаэвристическим алгоритмам оптимизации. Поскольку в данном алгоритме используется интенсификация, способствующая ускорению сходимости за счет использования в процессе поиска прошлых результатов [250, 251].

Алгоритм гармонического поиска состоит из следующих пяти этапов.

Этап 1. Инициализация параметров алгоритма

В общем виде задача глобальной оптимизации может быть записана как:

$$\begin{cases} f(x) \rightarrow \min \\ x_i \in X_i, i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5.14)$$

где $f(x)$ - целевая функция, x - множество переменных решения, X_i - множество возможных диапазонов значений каждой переменной решения, которое можно обозначить как $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(K)\}$ для дискретных переменных решения, соответствующих $x_i(1) < x_i(2) < \dots < x_i(K)$ или для непрерывных переменных решения. Кроме того, существуют параметры алгоритма гармонического поиска, необходимые для решения оптимизационных задач: объем памяти гармонии (HMS , количество векторов решений), скорость считывания гармонической памяти ($HMCR$), точность коррекции высоты тона (PAR) и критерий завершения (максимальное количество попыток). $HMCR$ и PAR - параметры, используемые для оптимизации вектора решения [252].

Этап 2. Инициализация гармонической памяти

Матрица гармонической памяти (HM) состоит из случайного количества векторов решений, соответствующего объему HMS . Они хранятся вместе со значениями целевой функции $f(x)$ в порядке возрастания:

$$HM = \begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^{HMS} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Этап 3. Создание новой гармонии на основе HM .

Новый гармонический вектор $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ формируется из HM на основе заданных $HMCR$, PAR и случайной выборки. Например, значение первой переменной принятия решения x'_1 для нового вектора может быть выбрано из любого значения на заданном диапазоне HM $x_1^1 \sim x_1^{HMS}$. Аналогично определяются значения других переменных. Параметр $HMCR$, изменяющийся в пределах от 0 до 1, позволяет выбрать новое значение из HM следующим образом:

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} & \text{с вероятностью } HMCR \\ x_i \in X_i & \text{с вероятностью } 1 - HMCR \end{cases} \quad (5.16)$$

$HMCR$ - это вероятность выбора одного значения из архивных значений в HM , величина $1 - HMCR$ - вероятность случайного выбора одного значения из возможного диапазона значений. Данный процесс аналогичен мутации в генетических алгоритмах. Например, если $HMCR = 0,95$, то алгоритм гармонического поиска с вероятностью 95% выберет значение переменной решения из HM , включающего архивные значения. В противном случае, с вероятностью 5%, он выберет значение из всего возможного диапазона. При низком коэффициенте учета памяти выбирается лишь несколько наилучших гармонических значений, и алгоритм может работать слишком медленно. Если этот показатель близок к 1, то используется большая часть частот в гармонической памяти, а остальные не используются должным образом, что приводит к неудачным решениям. Поэтому обычно рекомендуется определять значение $HMCR = 0,7 \sim 0,95$.

Кроме того, алгоритм гармонического поиска рассматривает каждый компонент нового гармонического вектора $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ с целью необходимости его корректировки в соответствии с высотой тона. В данном случае параметр PAR , задающий вероятность настройки на отклонение от HM используется следующим образом:

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } PAR \\ 0 & \text{с вероятностью } 1 - PAR \end{cases} \quad (5.17)$$

Процесс корректировки тона осуществляется только после выбора значения из HM . Величина $(1 - PAR)$ - это вероятность бездействия. Если значение $PAR = 0,1$, то алгоритм примет следующее значение с вероятностью $0,1 \times HMCR$. Например, если решение для x'_i в процессе корректировки тона равно 1, и x'_i принимается за $x_i(k)$, $k \in X_i$, то корректируемое по тону значение $x_i(k)$ изменяется на

$$\begin{aligned} x'_i &\leftarrow x_i(k + m) && \text{для дискретной переменной} \\ x'_i &\leftarrow x'_i + \alpha && \text{для непрерывной переменной} \end{aligned} \quad (5.18)$$

где m - индекс соседства, $m \in \{\dots, -2, -1, 1, 2, \dots\}$, α - значение $bw \times u(-1,1)$, bw - произвольно выбранная ширина полосы или ширина интервала непрерывных переменных, $u(-1,1)$ - случайное число из диапазона $[-1,1]$. Если скорость корректировки тона очень мала, то время работы алгоритма гармонического поиска возрастает. Напротив, если тон сильно завышен, то это может привести к рассеянию решения вокруг некоторого оптимального решения. Таким образом, в большинстве случаев используется значение $PAR = 0,1 \sim 0,5$. Параметры $HMCR$ и PAR помогают алгоритму гармонического поиска осуществлять глобальный и локальный поиск наилучших весов и смещений.

Этап 4. Оценка новой гармоничности и обновление HM .

Оценка новой гармоничности означает, что новая гармоничность (или вектор решения) используется в целевой функции и полученное значение сравнивается с вектором решения в существующем HM . Если новый гармонический вектор обеспечивает лучшую производительность, чем наихудшая гармоническая модель в HM , оцененная с точки зрения значения целевой функции, то новая гармония будет внесена в гармоническую память, а существующая наиболее худшая гармония будет исключена из гармонической па-

мента. В данном исследовании функция среднеквадратичной ошибки используется в качестве целевой функции как для оптимизации гармонического поиска, так и для обучения нейронной сети [253].

Этап 5. Повторение этапов 3 и 4 до тех пор, пока не будет удовлетворен критерий завершения.

На данном этапе производится проверка критерия завершения. Исходные значения весов, оптимизированные алгоритмом гармонического поиска, далее обучаются с помощью алгоритма градиентного спуска (рис.5.8).

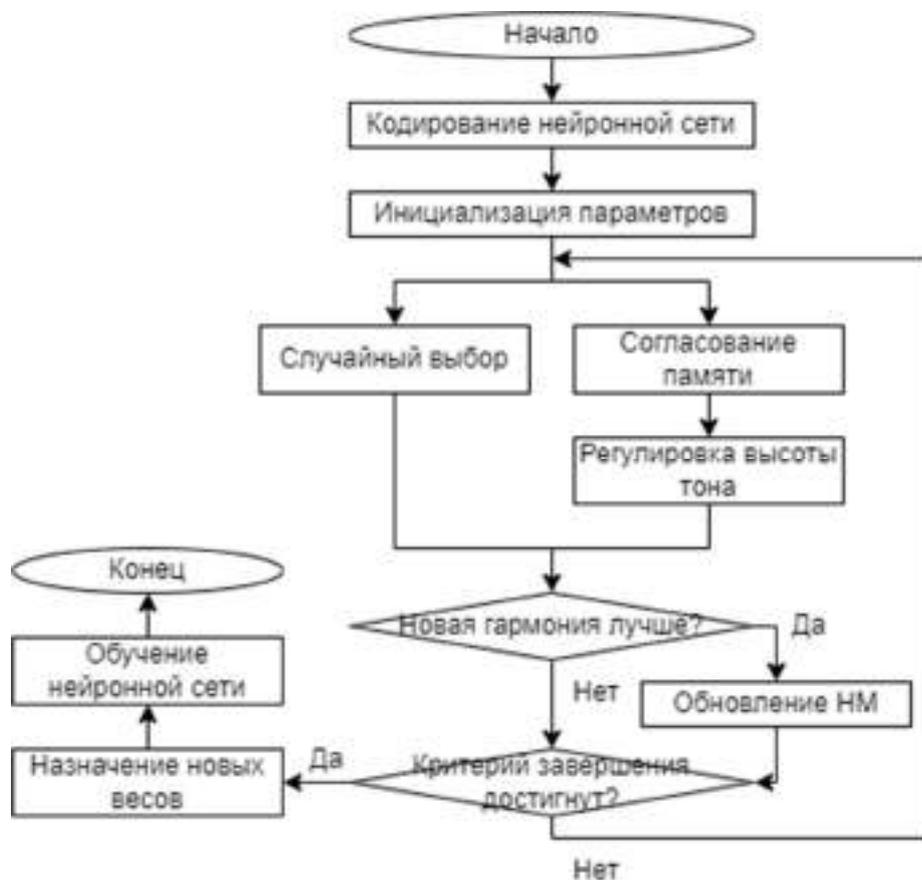


Рис.5.8. Схема алгоритма получения гибридной нейронной сети

Полученная таким образом гибридная модель нейронной сети используется в смарт-компоненте ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники для автоматического поиска решений.

Для оценки точности и стабильности работы автоматического поиска решений в информационно-измерительной и управляющей системе производственным процессом для микро- и наноэлектроники проведен эксперимент. В результате которого модель нейронной сети запускалась 50 раз, после чего проведен статистический анализ результатов моделирования. Каждое из значений *HMCR* и *PAR* алгоритма гармонического поиска определено таким образом, чтобы оно варьировалось от 0,1 до 0,9 с интервалом 0,2, таким образом, всего было протестировано 25 моделей гибридной нейронной сети. Модели использовались для контроля состояния производственной среды предприятия микроэлектроники. Для обучения и тестирования моделей использовались результаты 579 наблюдений.

Для оценки эффективности моделей применялись коэффициент корреляции r и индекс согласованности I_a между выходными значениями моделей и целевыми значениями 479 тестовых данных. В табл. 5.1 представлено максимальное значение коэффициента корреляции среди 50 циклов работы модели.

Таблица 5.1. Значение коэффициента корреляции

<i>HMCR / PAR</i>	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
0,1	0,957	0,971	0,961	0,973	0,964
0,3	0,959	0,967	0,970	0,972	0,960
0,5	0,961	0,954	0,961	0,957	0,968
0,7	0,968	0,973	0,959	0,967	0,970
0,9	0,971	0,970	0,972	0,970	0,960

Поскольку коэффициент корреляции позволяет оценить линейность между наблюдениями и прогнозом, но не их согласованность, для оценки точности дополнительно использовался индекс согласованности:

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|]^2} \quad (5.19)$$

где p_i и o_i обозначают прогнозируемые и наблюдаемые переменные, а \bar{o} - среднее значение наблюдаемых переменных. Значения I_a находятся в диапазоне от 0 до 1, где 1 означает абсолютную согласованность наблюдений и прогнозов, а 0 - полную несогласованность.

Статистическими параметрами, используемыми для измерения прогнозирующей способности и устойчивости моделей, являются среднее значение, стандартное отклонение и минимальное значение I_a . Чем больше среднее значение, тем лучше общая прогностическая способность модели. Чем меньше стандартное отклонение, тем выше стабильность работы модели, т.е. тем меньше разброс между результатами различных циклов работы модели. Соответственно, чем больше минимальное значение I_a , тем больше нижний предел прогностической способности модели. Таким образом, высокое среднее значение и высокое минимальное значение I_a свидетельствуют о высокой прогностической способности модели. С другой стороны, незначительное среднее отклонение свидетельствует о стабильности работы модели.

Статистические параметры для индекса согласованности: среднее значение – 0,948; стандартное отклонение - 0,021; минимальное значение – 0,889; максимальное значение 0,987. Кроме того, в результате эксперимента установлено, что гибридная модель обеспечивает наиболее высокую прогностическую способность и стабильность работы при $HMCR = 0,7$ и $PAR = 0,5$ или $HMCR = 0,9$ и $PAR = 0,1$.

Таким образом, сравнение статистических параметров гибридной модели показало, что ее использование в контуре управления информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и наноэлектроники с соответствующими значениями $HMCR / PAR$

позволяет обеспечить качественный и стабильный прогноз изменения состояния производственной среды и может быть использована в модуле автоматического поиска решений. В частности, незначительное стандартное отклонение гибридной модели свидетельствует о том, что модель отлично справляется с поиском глобального минимума функции ошибки.

Предлагаемый подход к контролю и управлению состоянием производственной среды с использованием автоматического поиска решения позволяет учитывать нелинейные зависимости измеряемых параметров. Для этого в состав информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и нанoeлектроники включен модуль автоматического поиска решения на основе гибридной нейронной сети. При разработке модели нейронной сети для подбора весов и смещений использовался алгоритм гармонического поиска, а для обучения – алгоритм градиентного спуска. Такой подход позволил получить на сравнительно небольшом количестве накопленных данных со значениями параметров производственной среды высокую точность прогнозирования. Практическое использование предлагаемого модуля автоматического поиска решения в составе информационно-измерительной и управляющей системы производственным процессом для микро- и нанoeлектроники обеспечило высокую стабильность работы и поддержание параметров в допустимом диапазоне.

5.4 ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ СО СМАРТ-КОМПОНЕНТОМ

На основании вышеизложенного точность оценки состояния в разработанном методе определяется точностью весового коэффициента. Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента для n итераций работы инфор-

мационно-измерительной и управляющей системы производственным процес-
сом для микро- и нанoeлектроники $\sigma = \sqrt{\frac{\Delta(a-a_{cp})^2}{n}}$ уменьшается с увеличением
итераций (табл.5.2, табл.5.3, табл.5.4).

Таблица 5.2. Результаты исследования процесса «А» производства изделий
микроэлектроники

№ итерации	Весовой коэффициент	Среднее (ожидаемое) значение весового коэффициента	Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента
1	0,801	0,900	0,099
2	0,815		0,092
3	0,911		0,075
4	0,917		0,066
5	0,907		0,059
6	0,901		0,053
7	0,9		0,049
8	0,9		0,046
9	0,9		0,044
10	0,9		0,041
11	0,9		0,039
12	0,9		0,038
13	0,9		0,036
14	0,9		0,035
15	0,9		0,034
16	0,9		0,033
17	0,9		0,032
18	0,9		0,031
19	0,9		0,030

№ итерации	Весовой коэффициент	Среднее (ожидаемое) значение весового коэффициента	Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента
20	0,9		0,029

Таблица 5.3. Результаты исследования процесса «Б» производства изделий микроэлектроники

№ итерации	Весовой коэффициент	Среднее (ожидаемое) значение весового коэффициента	Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента
1	0,476	0,50	0,024
2	0,601		0,073
3	0,581		0,076
4	0,532		0,067
5	0,491		0,060
6	0,503		0,055
7	0,5		0,051
8	0,5		0,048
9	0,5		0,045
10	0,5		0,042
11	0,5		0,040
12	0,5		0,039
13	0,5		0,037
14	0,5		0,036
15	0,5		0,035
16	0,5		0,033
17	0,5		0,032
18	0,5		0,032
19	0,5		0,031

№ итерации	Весовой коэффициент	Среднее (ожидаемое) значение весового коэффициента	Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента
20	0,5		0,030

Таблица 5.4. Результаты исследования процесса «В» производства изделий микроэлектроники

№ итерации	Весовой коэффициент	Среднее (ожидаемое) значение весового коэффициента	Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента
1	0,359	0,30	0,059
2	0,278		0,044
3	0,315		0,037
4	0,287		0,033
5	0,304		0,029
6	0,298		0,027
7	0,3		0,025
8	0,3		0,023
9	0,3		0,022
10	0,3		0,020
11	0,3		0,019
12	0,3		0,019
13	0,3		0,018
14	0,3		0,017
15	0,3		0,017
16	0,3		0,016
17	0,3		0,016
18	0,3		0,015
19	0,3		0,015

№ итерации	Весовой коэффициент	Среднее (ожидаемое) значение весового коэффициента	Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента
20	0,3		0,014

Исследование материалов отчетов по трем процессам и 20 итерациям работы ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники предприятия ООО «НМ-Тех» позволило установить, что отклонение весового коэффициента от ожидаемого значения менее 0,05 после 7 итерации и далее продолжает уменьшаться (рис.5.9). Следовательно, точность прогноза состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники с использованием разработанных алгоритмов после 7 итераций составляет 90,1% и далее продолжает расти.

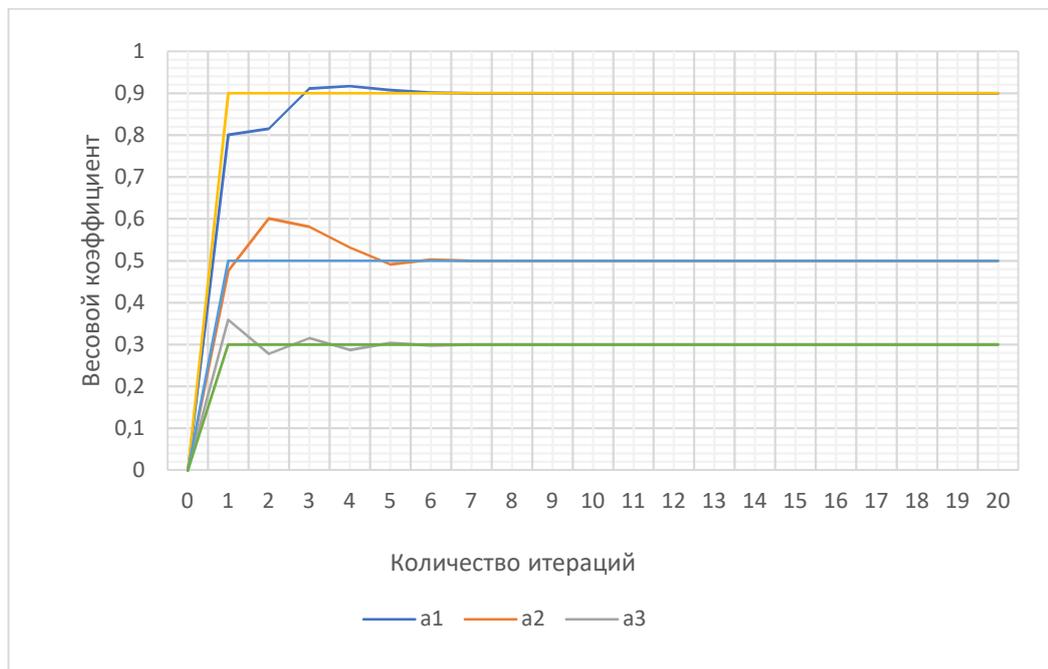


Рис.5.9. Значение весового коэффициента

Таким образом, разработанная модель позволяет определить состав характеристик, компонентов и алгоритмов смарт-компонента для обеспечения

управления ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники с точность оценки состояния процесса и прогноза его динамики более 90%.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Разработана архитектура ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники со смарт-компонентом с использованием полученной в настоящей диссертационной работе методики построения ИИУС. Смарт-компонент учитывает специфику конкретной ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники и позволяет обеспечить информационный обмен между всеми компонентами системы.

2. Разработан метод оценки состояния ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники с использованием логического анализа данных. Особенность метода заключается в формировании закономерностей с учетом их значимости и построении классификаторов состояний ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники. Метод оценки состояния позволяет учитывать все возможные характеристики системы, их значения и связи между ними.

3. Проведена оценка точности определения состояния ИИУС производственного процесса для микро- и наноэлектроники и точности прогноза изменения его состояния, которая составила 90%. При оценке точности использовалось значение среднеквадратичного отклонения ожидаемой величины характеристики от прогнозируемой.

ГЛАВА 6. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

6.1 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИНАХ 200 ММ

Качественное управление производством на всех уровнях позволяет повысить эффективность распределения финансовых, сырьевых и энергетических ресурсов, увеличить процент выхода годных изделий, снизить сроки изготовления продукции [253]. Известно, что принятие решений основано на контроле и оценке состояния объектов, входящих в контур управления и выявляемых при построении иерархической структуры производственного процесса.

Поведение ИИУС производственной линией изготовления микроэлектронных компонентов на кремниевых пластинах является случайным процессом с дискретными состояниями S_1, S_2, S_3, \dots и непрерывным временем. При этом для любого момента времени t_0 вероятностные характеристики поведения ИИУС зависят только от состояния компонентов в данный момент времени t_0 и не зависят от того, когда и как данное состояние наступило. Следовательно, поведение ИИУС производственной линией относится к марковским процессам. Докажем это. Пусть в момент времени t_0 i -й объект ИИУС находится в состоянии S_0 . Переход объекта в момент времени $t > t_0$ в S_1 зависит от S_0 , но не зависит от того, в какие моменты времени t_1 ($t_0 < t_1 < t$) наступали другие состояния объекта. Что соответствует определению марковского процесса [254].

Для анализа поведения ИИУС производственной линией как марковского построим граф ее дискретных состояний (рис.6.1). Для удобства рассмотрим два объекта из контура управления, состояние которых может выйти

за допустимые значения. При этом корректировка состояния начинается мгновенно и продолжается случайное время.

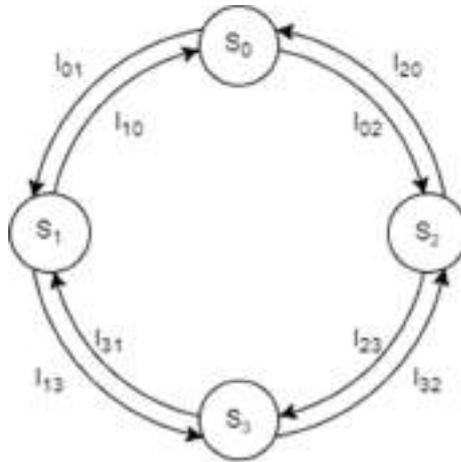


Рис.6.1. Граф состояний ИИУС производственной линией

Рассмотрим возможные состояния производственного процесса. S_0 - оба объекта работают в штатном режиме; S_1 - состояние первого объекта корректируется, второй объект работает в штатном режиме; S_2 - первый объект работает в штатном режиме, состояние второго объекта корректируется; S_3 - состояние обоих объектов корректируется. Следует обратить внимание, что переход из состояния S_0 в S_3 и S_1 в S_2 не исследуется, так как выход состояний объектов за пределы допустимых значений независимы друг от друга и вероятностями одновременного изменения состояния объектов или окончания корректировки состояния объектов можно пренебречь.

Для классификации состояний ИИУС и формирования траектории прохождения процесса изготовления микроэлектронных компонентов составлена постоянно пополняемая база знаний. База знаний представляет собой ориентированный граф $G(V, E)$, $V \neq \emptyset$, $E \subset V \times V \wedge \forall e \in E : |e| = 2$. Вершинами графа являются возможные состояния ИИУС, а ребрами – траектории по переходу из одного состояния в другое. Каждой вершине поставлено в соответствие не-

четкое множество, определяющее условия перехода в данное состояние. Использование ориентированного графа для построения базы знаний о состояниях ИИУС производственной линией позволяет контролировать поведения системы, делает базу знаний универсальной и адаптируемой под меняющиеся условия.

Основной характеристикой потока событий является интенсивность или среднее число событий за единицу времени. Исходя из данного утверждения получим, что переход из S_i в S_j осуществляется вследствие наступления событий с интенсивностью I_{ij} . Таким образом, выход состояния первого объекта за пределы допустимых значений является событием для перехода ИИУС из S_0 в S_1 ; окончание корректировки состояния первого объекта - из S_1 в S_0 . Аналогично для второго объекта. При этом в любой момент времени t сумма вероятностей всех состояний ИИУС производственной линией равна единице:

$$\sum_{i=0}^{n-1} p_i(t) = 1 \quad (6.1)$$

где $p_i(t)$ - вероятность i -го состояния ИИУС в момент времени t ; n - количество возможных состояний (для данного примера $n = 4$).

Рассмотрим ИИУС производственной линией в момент времени t и через малый промежуток времени dt , за который возможно изменение состояния. Исходя из вышеизложенного, нахождение ИИУС в состоянии S_0 в момент времени $t + dt$ возможно в двух случаях:

1. ИИУС производственной линией производства микроэлектронных компонентов за время dt не перешла в новое состояние, а осталась в S_0 , в котором находилась в момент времени t с вероятностью $p_0(t)$. Очевидно, что для смены состояния ИИУС необходимо осуществить поток событий с интенсивностью $(I_{01} + I_{02})$, при этом вероятность смены состояния равна $(I_{01} + I_{02})dt$, а вероятность того, что состояние не изменится - $(1 - (I_{01} + I_{02})dt)$. Тогда вероятность нахождения ИИУС в состоянии S_0 в данном случае

$$p_0(t) \cdot (1 - (I_{01} + I_{02})dt).$$

2. ИИУС производственной линией за время dt перешла в S_0 из S_1 или S_2 , в которых находился с вероятностями $p_1(t)$ и $p_2(t)$ соответственно. Переход ИИУС из состояния S_1 в S_0 осуществляется при интенсивности потока событий I_{10} с вероятностью $I_{10}dt$. Вероятность нахождения ИИУС в состоянии S_0 равна $p_1(t)I_{10}dt$.

Применяя аналогичные рассуждения для описание перехода ИИУС производственной линией изготовления микроэлектронных компонентов из S_2 в S_0 получим:

$$p_0(t + dt) = p_1(t)I_{10}dt + p_2(t)I_{20}dt + p_0(t)(1 - (I_{01} + I_{02})dt) \quad (6.2)$$

Или в дифференциальных уравнениях первого порядка:

$$p'_0 = I_{10}p_1 + I_{20}p_2 - (I_{01} + I_{02})p_0 \quad (6.3)$$

С учетом переходов между другими состояниями ИИУС производственной линией составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний:

$$\begin{cases} p'_0 = I_{10}p_1 + I_{20}p_2 - (I_{01} + I_{02})p_0, \\ p'_1 = I_{01}p_0 + I_{31}p_3 - (I_{10} + I_{13})p_1, \\ p'_2 = I_{02}p_0 + I_{32}p_3 - (I_{20} + I_{23})p_2, \\ p'_3 = I_{13}p_1 + I_{23}p_2 - (I_{31} + I_{32})p_3. \end{cases} \quad (6.4)$$

Решение (4) позволит получить все вероятности состояний ИИУС производственной линией как функции времени. Однако для решения требуется определить начальные условия $p_0(0) = 1$, $p_1(0) = p_2(0) = p_3(0) = 0$ и учитывать (1).

Решение задач управления требует детального рассмотрения ИИУС не только в определенном состоянии, но и установившегося поведения в долгосрочной перспективе (при $t \rightarrow \infty$). Для этого необходимо определить предельные вероятности состояний ИИУС, что позволит судить об ее устойчивости,

эффективности и качестве управления.

Предельные вероятности состояний ИИУС производственной линией являются постоянными величинами, следовательно, их производные равны нулю. Тогда система уравнений (4) имеет вид:

$$\begin{cases} (I_{01} + I_{02})p_0 = I_{10}p_1 + I_{20}p_2, \\ (I_{10} + I_{13})p_1 = I_{01}p_0 + I_{31}p_3, \\ (I_{20} + I_{23})p_2 = I_{02}p_0 + I_{32}p_3, \\ (I_{31} + I_{32})p_3 = I_{13}p_1 + I_{23}p_2. \end{cases} \quad (6.5)$$

Для системы с конечным числом состояний предлагается использовать следующий алгоритм для составления системы уравнений:

1. Обозначить предельные вероятности состояний как p_i , $i = 0, 1, \dots, n-1$, где n - количество состояний в системе.

2. Составить уравнения баланса вероятностей для каждого состояния.

Уравнение для i -го состояния будет иметь вид:

$$\sum_{j=0}^{n-1} I_{ij}p_i = \sum_{j=0}^{n-1} I_{ji}p_j, \quad i \neq j \quad (6.6)$$

3. Добавить уравнение (1).

4. Решить полученную систему уравнений для определения значений предельных вероятностей состояний.

Для ИИУС с бесконечным числом состояний применяются аналогичные принципы, но с использованием более сложных математических методов, таких как метод стационарного распределения или метод моментов.

Рассмотрим пример ИИУС производственной линией изготовления микроэлектронных компонентов, граф состояний которой аналогичен графу, изображенному на рис.6.1. Значения интенсивностей потоков событий, обуславливающих переходы между состояниями равны $I_{01} = 1$, $I_{02} = 2$, $I_{10} = 2$, $I_{13} = 2$, $I_{20} = 3$, $I_{23} = 1$, $I_{31} = 3$, $I_{32} = 2$.

Составив и решив систему уравнений

$$\begin{cases} 3p_0 = 2p_1 + 3p_2, \\ 4p_1 = p_0 + 3p_3, \\ 4p_2 = 2p_0 + 2p_3, \\ p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1. \end{cases} \quad (6.7)$$

Получим $p_0 = 0,4$, $p_1 = 0,2$, $p_2 = 0,27$, $p_3 = 0,13$. Другими словами, в стационарном режиме данная ИИУС будет работать в штатном режиме 40% времени, в состоянии выхода за допустимые пределы первого объекта – 20%, второго – 27. Время выхода из строя обоих объектов составляет 13%. Анализируя полученные результаты с точки зрения управления производством, можно сделать вывод о необходимости увеличения штатного режима работы процесса за счет дублирования объектов или усиления контроля за их состоянием в допустимых значениях.

Применение вероятностного подхода и дифференциальных уравнений Колмогорова к моделированию принятия решения при управлении производством микроэлектронных компонентов позволяют получить не только распределение вероятностей состояний ИИУС производственной линией как функции времени, но распределение времени пребывания ИИУС в возможных состояниях в стационарном режиме. Полученные результаты позволяют принимать эффективные и качественные решения на всех уровнях управления производством.

6.2 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Выходной контроль качества выпускаемой продукции остается актуальным и важным процессом для любого производственного предприятия. Этот вид контроля позволяет убедиться, что продукция соответствует установленным стандартам качества и безопасности перед тем, как она поступит к потребителю [255].

В настоящее время широкое распространение для автоматизации выходного контроля качества выпускаемой продукции получили системы технического зрения, состоящие из производственной камеры высокого разрешения и увеличения и программного обеспечения для последующей обработки изображений (рис.6.2). Кроме того, указанные системы позволяют не только определять дефекты выпускаемой продукции, но и сохранять данные о них и состоянии производственной среды в базу знаний с целью последующего анализа и выявления причин возникновения дефектов [256, 257].



Рис.6.2. Схема технической системы выходного контроля качества

Однако, точность определения дефектов при таком подходе в значительной степени зависит от качества получаемого изображения исследуемого изделия. Основным показателем качества изображения является четкость - степень полноты воспроизведения мелких деталей и резкость контуров исследуемого объекта.

Четкость зависит не только от параметров камеры, но и от внешних параметров окружающей среды: освещенность, расстояние от камеры до изделия, движения конвейерной ленты, расположения элемента на ленте, степень отражаемости поверхности исследуемого изделия. Следовательно, задача получения изображения высокого качества для его последующей обработки методами компьютерного зрения является своевременной и актуальной.

Для решения данной задачи предлагается управлять положением ка-

меры, состоянием окружающей среды с использованием методов искусственного интеллекта [256]. В контуре управления ИИУС выходного контроля качества расположена нейронная сеть, которая на основе входных параметров: скорости движения ленты, уровня освещенности и расстояния от камеры до изделия позволяет подбирать управляющее воздействие, которое быстро и с высокой точностью изменяет положение камеры.

Для согласованности действий всех компонентов рассмотренной ИИУС необходимо учитывать параметры движения конвейерной линии с расположенными на ней изделиями. Пусть камера, сканирующая расположенные под ней проверяемые изделия, расположена в точке над конвейерной лентой, движущейся с постоянной скоростью v (рис.6.3). Для удобства расчетов определим проекцию точки расположения камеры на ось x в точку A с координатой $x = 0$.

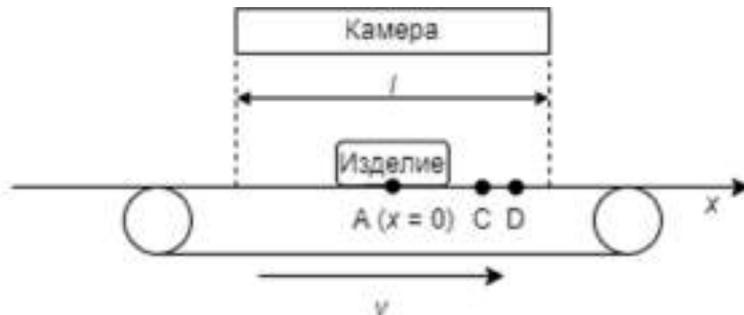


Рис.6.3. Схема проверки качества изделий

Сканирование изделия возможно после его полного попадания в поле захвата камеры, длина которого равна l и через время $\tau = \frac{l}{v}$. При этом учитываем, что захват изделия осуществляется камерой сразу с приемлемой для распознавания четкостью изображения. Четкость получаемого изображения кроме характеристик самой камеры зависит от уровня освещенности сканируемого участка и скорости его движения.

Известно, что четкость изображения оценивается количеством различных линий тестового изображения. При этом использование форматов высокой четкости, например, HD, 4K, - приводит к повышению разрешения изображения и применению эффективных методов сжатия для обеспечения высокой скорости передачи данных. Для оценки четкости изображения на основе стандарта ISO-12233:2017 применяется пространственная частотная характеристика, определяемая как функция спада контраста мелких деталей от пространственной частоты. Как правило, для цифровых камер значение пространственной частоты соответствует потенциальному разрешению в пикселях. Однако, на практике по рекомендации того же стандарта, используется реальное разрешение цифровой камеры, определяемое как отношение измеренной частоты к значению 0,5. Например, если пространственная частота равна 0,4, то четкость изображения равна $0,4/0,5 = 0,8$. Очевидно, что чем ближе значение четкости к 1, тем выше качество изображения. Кроме того, разрешение камеры и спад пространственной частотной характеристики определяется параметрами самой камеры и состоянием окружающей среды [257].

Учитывая вышеизложенное, четкость изображения проверяемого изделия на расстоянии x от точки А в точке С в момент времени t равна $q(x, t)$. По истечении малого промежутка времени Δt точка изображения с данной четкостью сместится на расстояние $x + \Delta x$ в точке D, но при этом четкость изображения в ней сохранится. Следовательно,

$$q_C(x, t) = q(x, t) = q_D(x + \Delta x, t + \Delta t) \quad (6.8)$$

В тот же момент времени четкость изображения в новой точке изделия, пришедшей в точку С, равна $q_C(x, t + \Delta t)$. При этом

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{q_D(x + \Delta x, t + \Delta t) - q_C(x, t + \Delta t)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{q_C(x, t) - q_C(x, t + \Delta t)}{\Delta x} \quad (6.9)$$

Известно, что при постоянной скорости конвейерной ленты $\Delta x = v\Delta t$, тогда

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{1}{v} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q(x, t) - q(x, t + \Delta t)}{\Delta t} = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} \quad (6.10)$$

Изображение Лапласа при $x(0) = 0$ для уравнения (3) имеет вид:

$$\frac{\partial Q(x, s)}{\partial x} + \frac{s}{v} Q(x, s) = 0 \quad (6.11)$$

Решая данное уравнение, в котором x является независимой переменной, получим:

$$Q(x, s) = C(t) e^{\frac{sx}{v}}, \quad (6.12)$$

где не зависящая от x величина $C(t)$ определяется краевыми условиями. Если входной величиной является сама функция $q(0, t)$, а выходной - $q(l, t)$, то получаем краевые условия первого рода, при которых:

$$Q_{ex} = Q(0, s) = C(t); \quad Q_{быx} = Q(l, s) = C(t) e^{\frac{sl}{v}} = Q(0, s) e^{-s\tau}, \quad (6.13)$$

где $\tau = \frac{l}{v}$. Передаточная функция имеет вид:

$$W(l, s) = \frac{Q_{быx}}{Q_{ex}} = e^{-s\tau} \quad (6.14)$$

Переходная функция $h(t) = 1(1 - \tau)$. Характеристическое уравнение $D(s) = e^{s\tau} = e^{\alpha\tau} e^{j\omega\tau} = 0$ имеет бесконечное множество корней с бесконечно большой отрицательной вещественной частью. Частотная характеристика $W(t, j\omega) = e^{-j\omega\tau} = \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau$ имеет равный единице модуль и изображается кругом единичного радиуса с центром в начале координат. При бесконечном возрастании ω этот круг бесчисленное количество раз обходится по часовой стрелке. Относительные амплитуды выходной величины при всех частотах равны единице.

Уточним математическую модель рассматриваемой ИИУС выходного контроля качества выпускаемой продукции, учитывая инерционность переме-

щения изделия на конвейерной ленте. Пусть входной u_{ex} и выходной $u_{вых}$ сигналы связаны с четкостью получаемого изображения q и $q(l, t)$ уравнениями:

$$(T_1 p + 1)q = k_1 u_{ex}; (T_2 p + 1)u_{вых} = k_2 q(l, t), \quad (6.15)$$

тогда

$$Q(0, s) = \frac{k_1 U_{ex}(s)}{T_1 s + 1}; Q(l, s) = \frac{U_{вых}(s)(T_2 s + 1)}{k_2} \quad (6.17)$$

$$W = \frac{U_{вых}(s)}{U_{ex}(s)} = \frac{k_1 k_2}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \cdot \frac{Q(l, s)}{Q(0, s)} = W_0 W_\tau, \quad (6.18)$$

где $W_0 = \frac{k_1 k_2}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ - передаточная функция линейной части рассматриваемой ИИУС; $W_\tau = e^{-s\tau}$ - передаточная функция конвейерной составляющей рассматриваемой ИИУС для контроля качества выпускаемой продукции.

Таким образом, основной целью управления ИИУС выходного контроля качества выпускаемой продукции является выполнение неравенства:

$$|q - q(l, \tau)| \leq \varepsilon, \quad (6.19)$$

где q - требуемая четкость изображения, получаемого камерой; $q(l, \tau)$ - четкость изображения, полученного камерой; ε - допустимая погрешность.

Как уже отмечалось выше, итоговая четкость изображения зависит от нескольких параметров, в том числе от связей между ними. Учитывать совокупность нескольких связанных параметров эффективнее с использованием нейронной сети. Существующие модели нейронных сетей, основанные на анализе больших данных, позволяют с высокой точностью прогнозировать изменение состояния ИИУС и подбирать требуемые параметры для его изменения [245, 258].

Известно, что данные, используемые для разработки модели нейронной сети, делятся на две части: данные для обучения модели и тестовые данные для проверки работоспособности обученной модели. Обучающие данные должны иметь выборку, отражающую их характеристику. В противном случае

модель будет плохо работать для тех случаев, которые не встречались в процессе обучения. Для решения данной проблемы предлагается использовать метод типологической выборки, при котором для обучения отбирается 100 комплектов данных, а для тестирования – все остальные, в данном случае - 500. Основная идея типологической выборки заключается в том, чтобы разделить весь диапазон переменных на множество поддиапазонов и отобрать данные таким образом, чтобы масса вероятности в каждом поддиапазоне стала одинаковой между выборкой и совокупностью. Поскольку в данном исследовании задействовано небольшое количество переменных, выборка осуществлялась вручную.

Для оценки эффективности типологической выборки существуют два вида статистических критериев: параметрические и непараметрические [259]. Исходя из этого, функция массы вероятности каждой переменной в данном исследовании не соответствует обычному распределению, использовался непараметрический критерий хи-квадрат. В основе критерия хи-квадрат лежит ошибка между предполагаемой и наблюдаемой плотностями вероятностей. В тесте каждый из диапазонов n наблюдаемых данных разбивается на m поддиапазонов. При этом подсчитывается количество частот n_i переменной в i -ом поддиапазоне. Далее сравниваются наблюдаемые частоты $n_i, i = 1..m$ и соответствующие им теоретические частоты $e_i, i = 1..m$ предполагаемого распределения. При стремлении общего числа точек выборки n к ∞ величина $\sum_{i=1}^m \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i}$ приближается к распределению хи-квадрат с $f = m - 1 - k$, где k - число параметров в предполагаемом распределении. Для нетипичного распределения k равно нулю. Считается, что наблюдаемое распределение соответствует предполагаемому распределению с уровнем значимости σ , если

$$\sum_{i=1}^m \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} < c_{1-\sigma, f}, \quad (6.20)$$

где $c_{1-\sigma, f}$ обозначает значение распределения хи-квадрат со степенью свободы

f при кумулятивной массе $1 - \sigma$.

Для оценки эффективности с использованием критерия хи-квадрат диапазон каждой переменной (освещенность, расстояние до сканируемого изделия, степень отражения поверхности изделия, скорость движения конвейерной ленты) разбивался на 8 поддиапазонов. В качестве примера на рис.6.4 приведено сравнение массовых функций вероятности обучающих данных и экспериментальных значений четкости полученного изображения, которое показывает, что они хорошо согласуются.

Для реализации модели нейронной сети использован многослойный перцептрон, поскольку в модели имеется небольшое количество параметров с нелинейной зависимостью. Модель направлена на получение оптимизированных весов сети с помощью алгоритма обучения, который призван минимизировать ошибки между выходной и целевой переменными благодаря изменению взаимосвязанных весов [260, 261]. В данном исследовании используется перцептрон с одним скрытым слоем (рис.6.5), где i - количество входных переменных.

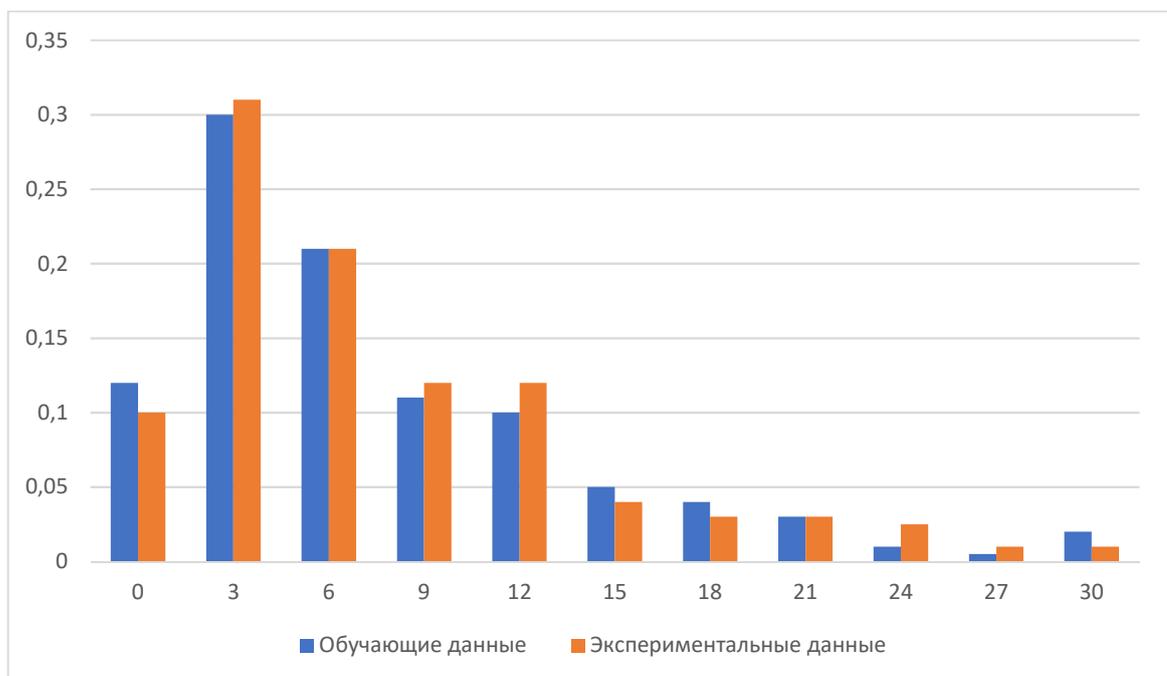


Рис.6.4. Массовые функции вероятности четкости полученного изображения

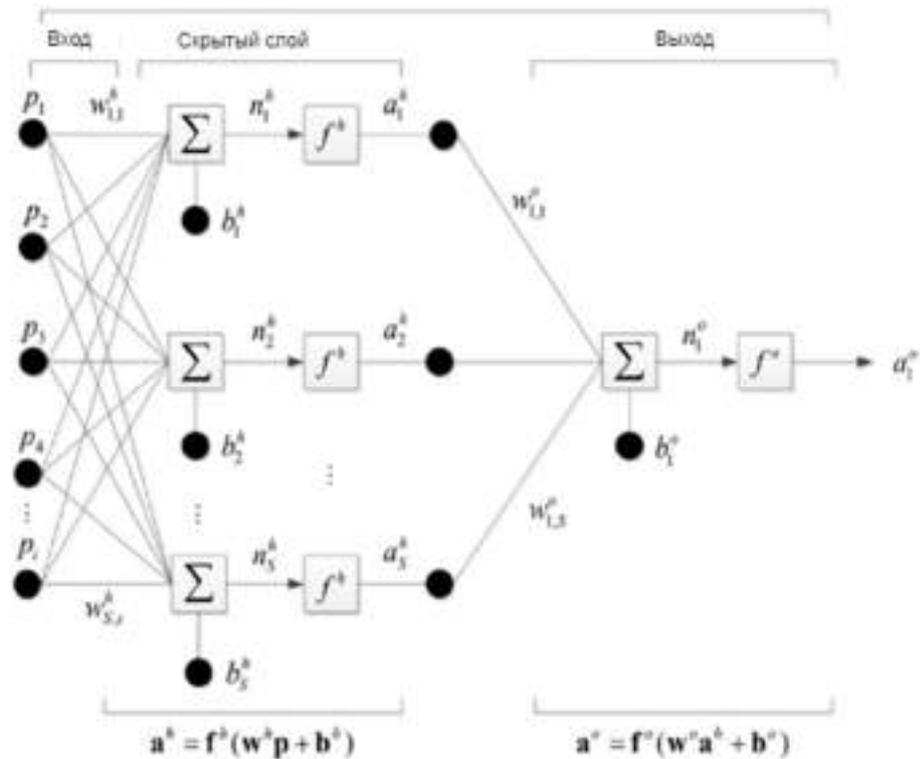


Рис. 6.5. Топология нейронной сети для управления ИИУС выходного контроля качества изделий

Методика обучения и применения разработанной нейронной сети заключается в следующем:

1) Для каждой входной и выходной переменных данные нормализуются в рамках диапазона $[-1;1]$.

2) Начальные веса в скрытом слое задаются в виде случайных значений, принадлежащих интервалу $[-1;1]$; начальные смещения устанавливаются равными нулю.

3) Матрица весов умножается на входные данные, p , и добавляется смещение так, чтобы $n_k^h = \sum_{j=1}^J \omega_{kj}^h p_j + b_k^h$, $k = 1, \dots, K$, где J , K - количество входных переменных и скрытых нейронов, соответственно; p , b^h , ω^h - входная переменная, смещение и вес в скрытом слое, соответственно. Подстрочные индексы веса ω^h записываются следующим образом: первый подстрочный индекс обозначает нейрон, о котором идет речь, второй - входную переменную,

к которой относится вес. Рассчитанное значение n_k^h используется в функции активации f^h для вычисления a_k^h . В качестве функции активации используется сигмоидная функция с гиперболическим тангенсом:

$$a_k^h = \frac{e^{n_k^h} - e^{-n_k^h}}{e^{n_k^h} + e^{-n_k^h}} \quad (6.21)$$

4) В выходном слое используется та же процедура, что и в скрытом слое, за исключением того, что задействован только один нейрон $n_1^o = \sum_{j=1}^K \omega_{1j}^o a_j^h + b_1^o$, и линейная функция для вычисления $a_1^o = n_1^o$.

Нейронная сеть со случайно заданными начальными весами и смещениями не позволяет получить результат с требуемой точностью. Для этого в процессе обучения веса и смещения изменяются таким образом, чтобы минимизировать разницу между выходным и целевым значениями модели. Для обучения сети функция ошибки определяется как $\varepsilon = \|\tau - a_1^o\|^2$, где τ - искомый вектор целевых значений.

Для минимизации функции ошибки используется алгоритм Левенберга-Марквардта, применяемый для решения нелинейных задач наименьших квадратов [262]. Как и другие численные алгоритмы минимизации, алгоритм Левенберга-Марквардта – итерационная процедура. Он предполагает наличие параметра затухания μ и коэффициента θ больше единицы. В данном исследовании использовались $\mu = 0,001$ и $\theta = 10$. Если квадратичная ошибка увеличивается, то демпфирование увеличивается путем последовательного умножения на θ до тех пор, пока ошибка не уменьшится с новым параметром демпфирования $\mu\theta^k$ для некоторого k . Если ошибка уменьшается, то на следующем шаге параметр демпфирования делится на θ . Обучение прекращалось, когда цикл достигал 5000 итераций или параметр демпфирования становился слишком большим для дальнейшего обучения.

На рис.6.6 представлены фрагменты изображений поверхностного дефекта типа «нависание» до и после использования предлагаемой ИИУС для контроля дефектов.



Рис.6.6. Фрагмент изображения с дефектом типа «нависание»
а) до управления положением камеры и б) после применения управления
положением камеры

Следовательно, разработанная и включенная в контур управления нейронная сеть позволяет формировать управляющее воздействие для изменения параметров окружающей среды и положения камеры с целью получения изображения высокой четкости, и, как следствие, повышению эффективности распознавания дефектов.

Алгоритм управления ИИУС для контроля поверхностных дефектов условно делится на две части: управление состоянием окружающей среды (освещенность, скорость движения ленты); управление положением камеры (рис.6.7).

На начальном этапе происходит определение параметров окружающей среды и сравнение их с требуемыми значениями с учетом погрешности. В случае существенного отклонения параметров окружающей среды происходит их корректировка.



Рис.6.7. Схема алгоритма управления ИИУС для контроля поверхностных дефектов

На следующем этапе определяются технические параметры камеры, рассчитывается фокусное расстояние и измеряется высота положения камеры от сканируемого изделия. При необходимости производится корректировка положения камеры для получения изображения высокой четкости.

Далее производится оценка четкости полученного изображения. При недостаточном значении четкости осуществляется корректировка положения камеры с повторным сканированием изделия.

Кроме того, важное значение в работе ИИУС для контроля поверхностных дефектов имеет калибровка. Периодическая калибровка системы необходима для поддержания высокого качества изображения и включает в себя проверку параметров камеры, освещения и других переменных.

Описанный выше алгоритм позволит эффективно управлять ИИУС для контроля поверхностных дефектов и обеспечить получение изображений высокой четкости для дальнейшего анализа и принятия решений.

Основной частью рассмотренной практической реализации ИИУС для контроля качества выпускаемой продукции с использованием методов искусственного интеллекта является система технического зрения, позволяющая визуально определять дефекты на проверяемых изделиях. Качество проверки в значительной степени зависит от качества получаемого изображения, которое, в свою очередь зависит от ряда параметров. Предложенный способ повышения управляемости ИИУС позволяет корректировать параметры, влияющие на качество изображения, путем включения в контур управления нейронной сети на основе перцептрона. Нейронная сеть с высокой точностью позволяет прогнозировать изменение значимых параметров и формировать управляющее значение для их корректировки, что, в свою очередь, позволяет получить высокое качество изображения проверяемой продукции в режиме реального времени без ручной настройки исполнительного оборудования.

6.3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОЦЕССА НАНОЛИТОГРАФИИ

Современное производственное предприятие насчитывает множество сложного технологического оборудования, организация эффективной работы которого позволяет повышать производительность, качество выпускаемой продукции с минимизацией потери времени и ресурсов. С учетом быстрого развития технологий и появления новых требований к точности и скорости

производимых операций и действий, управление технологическим оборудованием становится все более важным для обеспечения конкурентоспособности предприятия.

Эффективное управление технологическим оборудованием невозможно без оценки и контроля его состояния. В современных информационно-измерительных и управляющих системах используются различные модели технологического оборудования, позволяющие анализировать текущее состояние оборудования и прогнозировать его изменение. Как правило, моделирование ИИУС состоит в построении наиболее близкой к исследуемой системе механической модели, состояние которой описывается дифференциальными уравнениями. Однако, такой подход не позволяет учитывать множество взаимосвязанных параметров, оказывающих влияние на состояние технологического оборудования. Например, для вакуумной установки, входящей в состав литографа для микроэлектроники, такими взаимосвязанными параметрами будут: влажность, температура, давление воздуха окружающей среды, запыленность и др.

Для определения сложной нелинейной зависимости между текущим состоянием ИИУС и влияющими на нее факторами: состоянием окружающей среды, исполнительного оборудования и оператора, - используется модель многослойной нейронной сети с обучением методом обратного распространения ошибки. Верификации разработанной модели состояния технологического оборудования проводится для вакуумной установки, входящей в состав установки рентгеновского нанолитографа на основе МЭМС - динамической маски для формирования наноструктур с размерами от 13нм и ниже на базе синхротронного и/или плазменного источника.

ИИУС для установки нанолитографа состоит из модулей измерения и контроля параметров вакуумной установки; оптической установки, включая МЭМС - динамическую маску; системы экспонирования и совмещения элементов изделий; оценки состояния указанных установок и систем; формиро-

вания управляющих воздействий для установок и систем; управления в исключительных ситуациях; формирования рекомендаций по улучшению работы нанолитографа (рис.6.8). Обобщенная модель ИИУС нанолитографа представляет собой совокупность элементов N :

$$N = \langle K, P, U, F, D, O_1, O_2, O_3, O_4 \rangle \quad (6.22)$$

K – контрольно-измерительное оборудование; P – программируемый логический контроллер (ПЛК); U – программные модули; F – предельные значения контролируемых параметров $(k, f): k \in K. O_1 - K \times U. O_2 - K \times F. O_3 - P \times U. O_4 - P \times F.$

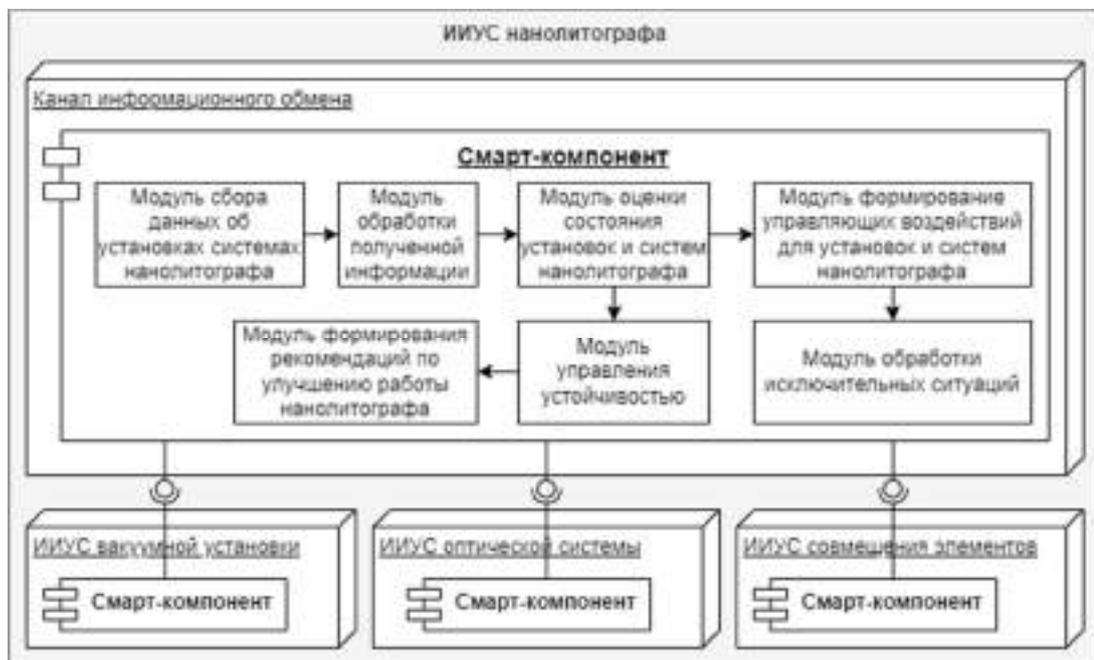


Рис.6.8. Архитектура ИИУС нанолитографа

Отношения O_i имеют свойства:

1. $\forall k_i \in K \exists U_i \subset U: \forall u \in U_i \rightarrow (k_i, u) \in O_1 \equiv k_i O_1 u \wedge |U_i| \geq 1.$
2. $\forall k_i \in K \exists F_i \subset F: \forall f \in F_i \rightarrow (k_i, f) \in O_2 \equiv k_i O_2 f \wedge |F_i| \geq 1.$
3. $\forall p_i \in P \exists U_i \subset U: \forall u \in U_i \rightarrow (p_i, u) \in O_3 \equiv p_i O_3 u \wedge |U_i| \geq 1.$
4. $\forall p_i \in P \exists F_i \subset F: \forall f \in F_i \rightarrow (p_i, f) \in O_4 \equiv p_i O_4 f \wedge |F_i| \geq 1.$
5. $\forall u \in U \exists! k \in K: k O_1 u; \forall u \in U \exists! p \in P: p O_3 u.$
6. $\forall f \in F \exists! k \in K: k O_2 f; \forall f \in F \exists! p \in P: p O_4 f.$

Модель смарт-компонента ИИУС нанолитографа имеет вид:

$$N^S = \langle K^S, P^S, U^S, Z, O_1^S, O_5, O_3^S, O_6 \rangle \quad (6.23)$$

K^S – контрольно-измерительное оборудование, $K^S \subset K$. P^S – ПЛК, $P^S \subset P$. U^S – программные модули, $U^S \subset U$. Z – результат достижения предельных значений контролируемых параметров, $(k^S, z_i): k^S \in K^S, \exists z_i \in \{1, 0\}$. $O_1^S - K^S \times U^S$. $O_5 - K^S \times Z$. $O_3^S - P^S \times U^S$. $O_6 - P^S \times Z$.

Свойства отношений модели смарт-компонента N^S :

1. $O_1^S \subset O_1$, $O_3^S \subset O_3$. Следовательно, отношения O_1^S и O_3^S обладают теми же свойствами, что и отношения O_1 и O_3 .

$$2. \forall k_i^S \in K^S \exists z_i \subset Z: \forall z \in Z_i \rightarrow (k_i^S, z) \in O_5 \equiv k_i O_{5z} \wedge |Z_i| \geq 1.$$

$$3. \forall p_i^S \in P^S \exists z_i \subset Z: \forall z \in Z_i \rightarrow (p_i^S, z) \in O_6 \equiv p_i O_{6z} \wedge |Z_i| \geq 1.$$

$$4. \forall z \in Z \exists! k^S \in K^S: k^S O_{5z}; \forall z \in Z \exists! p^S \in P^S: p^S O_{6z}.$$

На основе сравнения моделей N и N^S с использованием графового представления и (5.11)-(5.13) вычисляется оценка управляемости ИИУС нанолитографа; формируются рекомендации по повышению эффективности управления процессом нанолитографии.

Модель смарт-компонента вакуумной установки нанолитографа:

$$S = \langle R, P^S, V, O_7, O_8 \rangle \quad (6.24)$$

R – технические требования процесса. P^S – ПЛК. V – программные модули. O_7 – отношение $R \times V$. O_8 – отношение $P^S \times V$.

Отношения O_7 и O_8 обладают свойствами:

$$1. \forall r_i \in R \exists v_i \subset V: \forall v \in V_i \rightarrow (r_i, v) \in O_7 \equiv r_i O_{7v} \wedge |V_i| \geq 1.$$

$$2. \forall p_i^S \in P^S \exists v_i \subset V: \forall v \in V_i \rightarrow (p_i^S, v) \in O_8 \equiv p_i^S O_{8v} \wedge |V_i| \geq 1.$$

$$3. \forall v \in V \exists! p^S \in P^S: p^S O_{7v}; \forall v \in V \exists! p^S \in P^S: p^S O_{8v}.$$

На основе графового представления N^S и S и (5.11)-(5.13) сделан вывод об управляемости ИИУС вакуумной установкой; аналогично для ИИУС оптической системы и системы совмещения и экспонирования.

В качестве компонентов ИИУС нанолитографа использованы ПЛК «Багет-ПЛК1», оптические датчики KIPPRIBOR ОК30, терморегулятор DigiTOP

ТК-4 с выносным датчиком температуры, измеритель давления Мерадат-ВИТ16Т3, датчик вибрации IFM Electronic VKV021.

На основе анализа математических моделей нестационарного воздушного потока и отложений в качестве входных параметров модели ИИУС для вакуумной установки выбраны четыре фактора: приток воздуха в камеру вакуумной установки, степень вакуума, давление в камере установки и мощность откачного насоса. В качестве выходного параметра модели используется время, за которое степень вакуума примет требуемое значение, что позволит оценить точность моделирования и прогнозирования состояния технологического оборудования. Для обучения нейронной сети используются накопленные за период эксплуатации литографа данные.

Нелинейное отображение многослойной нейронной сети позволяет исследовать сложную взаимосвязь между многочисленными зависимыми и независимыми переменными при управлении вакуумной установкой нанолитографа с высокой точностью моделирования и большой практической реализуемостью. Учитывая эффективность и практичность вычислений в данном исследовании многослойная нейронная сеть используется для моделирования состояния вакуума в камере нанолитографа и прогнозирования изменения степени вакуума при различных режимах работы установки.

Управляемость ИИУС вакуумной установкой литографа определяется показателем λ остаточного объема воздуха в камере:

$$\lambda = \frac{S_{out}}{S_{in}} \quad (6.25)$$

где S_{out} - объем откачанного из камеры воздуха, S_{in} - объем поступившего в камеру установки воздуха.

Исходя из математической модель нестационарного воздушного потока и отложений, выбраны основные факторы, влияющие на состояние ИИУС вакуумной установки в камере нанолитографа. Разработанная математическая модель состояния ИИУС вакуумной установки нанолитографа состоит из уравнения неразрывности воздушного потока, уравнения движения воздушного

потока, уравнения непрерывности отложений воздушного слоя и уравнение изменения степени вакуума:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^3} = 0 \\ \frac{\partial AS}{\partial t} + \frac{\partial QS}{\partial x} = -\alpha B \omega (S - S_p) \\ \gamma_s \frac{\partial A_s}{\partial t} = \alpha \omega B (S - S_p) \end{cases} \quad (6.26)$$

где $H = L - T$, $\omega = \sqrt{\left(13,95 - \frac{v}{d}\right)^2 + 1,09 \frac{\gamma_s}{\gamma} gd - 1,95 \frac{v}{d}}$, $S_p = k \left(\frac{U^3}{gR\omega} \right)'$ и γ , γ_s -

объемный вес поступающего и имеющегося в камере воздуха, соответственно; d - прокачиваемый за один раз объем воздуха; A - площадь поперечного сечения камеры вакуумной установки; R - гидравлический радиус установки; Q - изменение степени вакуума; B - ширина поперечного сечения камеры вакуумной установки; H - напор входящего потока воздуха; L - степень вакуума в камере; T - высота камеры вакуумной установки; α - коэффициент восстановления степени вакуума в камере литографа; ω - скорость изменения степени вакуума; S - пропускная способность наносов; S_p - пропускная способность воздушного потока; k , g - вспомогательные коэффициенты; v - кинематический коэффициент.

В процессе исследования технических данных о работе литографа получено, что состояния вакуума зависит от параметров окружающей среды, в частности, температуры и влажности. Для повышения точности моделирования, характеристики вакуума следует изучать отдельно для разных значений параметров окружающей среды. При этом параметры воздуха и насосов, такие как объемный вес, напор, пропускная способность потока и кинематический коэффициент, считаются неизменными. Для каждого технологического про-

цесса требуемая степень вакуума определяется правилами эксплуатации и техническими условиями. Таким образом, геометрические параметры в уравнении (6.26), включая площадь поперечного сечения, ширину камеры вакуумной установки и гидравлический радиус, также могут рассматриваться как постоянные.

На основе данного анализа сделан вывод о том, что основными факторами, влияющими на управляемость ИИУС вакуумной установкой нанолитографа, являются: приток воздуха, текущая степень вакуума и мощность откачного насоса.

Известно, что обработка информации нейронами состоит из двух фаз: на первой нейроны получают информацию и взвешивают ее, что называется процессом интеграции; на второй фазе нейроны обрабатывают интегрированную информацию с помощью линейных или нелинейных функций, что называется процессом активации. Таким образом, процесс ввода информации и вывода ответа представляется уравнением передачи активации:

$$Y = F\left(\sum_{i=1}^n X_i W_i\right) \quad (6.27)$$

где Y - выход нейрона; F - характеристика отклика нейрона на входную информацию; X - входная информация, соответствующая i -ому узлу; W - вес i -ого узла.

Разрабатываемая нейронная сеть состоит из входного слоя, нескольких скрытых слоев и выходного слоя, и в каждом слое имеется определенное количество нейронов, которые также называются узлами. Сопоставление нейронов между различными слоями осуществляется с помощью передаточной функции активации S -типа:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-tx}} \quad (6.28)$$

Для обучения разработанной многослойной нейронной сети используется метод обратного распространения ошибки, позволяющий эффективно решить проблему настройки веса многослойной нейронной сети с обратной связью

для нелинейных непрерывных функций.

Известно, что метод обратного распространения ошибки основан на технологии градиентного поиска с двумя процессами: прямым распространением информации и обратным распространением ошибок. При прямом распространении входной сигнал проходит через скрытые слои к выходному слою. Если на выходе появляется желаемый результат, алгоритм обучения завершается, в противном случае он переходит к обратному распространению. При обратном распространении ошибка проходит через выходной слой, и веса нейронов каждого слоя корректируются в соответствии с методом градиентного спуска с целью уменьшения ошибки получения выходного значения ближе к ожидаемым значениям. Благодаря способности к нелинейному отображению, метод обратного распространения ошибки используется для установления взаимосвязи между состоянием ИИУС вакуумной установки нанолитографа и влияющими на нее факторами, этапы расчета которых показаны ниже.

Предположим, что u - входной вектор, n - количество нейронов во входном слое, y - выходной вектор, m - количество нейронов в выходном слое, L - длина пары входных/выходных образцов, тогда этапы алгоритма обратного распространения ошибки включают:

1) Установка в качестве значения начального веса $w(0)$ относительно небольшой случайной ненулевой величины;

2) Задание пары образцов вход/выход и вычисление выхода нейронной сети:

Предположим, что вход p -ой выборки - $u_p = (u_{1p}, u_{2p}, \dots, u_{np})$, выход p -ой выборки - $d_p = (d_{1p}, d_{2p}, \dots, d_{mp})$, $p = 1, 2, \dots, L$, тогда выход узла i с p -ой выборкой

$$- y_{ip}(t) = f[x_{ip}(t)] = f\left[\sum_j \omega_{ij}(t) I_{jp}\right], \text{ где } I_{jp} - \text{вход } j \text{ узла } i \text{ при подаче образца } p, \text{ а } f - \text{передаточная функция активации, представленная в уравнении (6.28);}$$

p , а f - передаточная функция активации, представленная в уравнении (6.28);

3) Вычисление целевой функции J данной сети:

Предположим, что E_p - целевая функция сети при вводе выборки p , тогда:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_k [d_{kp} - y_{kp}(t)]^2 = \frac{1}{2} \sum_k e_{kp}^2(t) \quad (6.29)$$

где y_{kp} - выходные данные сети после t -кратной настройки значений веса при вводе выборки p , k - индекс узла выходного слоя.

Общая целевая функция нейронной сети:

$$J(t) = \sum_p E_p(t) \quad (6.30)$$

4) Определение условия остановки алгоритма: если $J(t) < \varepsilon$, то алгоритм останавливается, в противном случае осуществляется переход к шагу (5), где $\varepsilon > 0$ и задается предварительно;

5) Расчет параметров по методу обратного распространения ошибки:

В выходном слое, начиная с J , производится расчет по алгоритму градиентного спуска для корректировки значения веса. Принимая длину шага за постоянную, скорректированный вес связи $(t + 1)$ от нейрона j к нейрону i составляет:

$$\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial \omega_{ij}(t)} = \omega_{ij}(t) - \eta \sum_p \frac{\partial E_p(t)}{\partial \omega_{ij}(t)} = \omega_{ij}(t) + \Delta \omega_{ij}(t) \quad (6.31)$$

где η - длина шага.

$$\frac{\partial E_p}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{ip}} \cdot \frac{\partial x_{ip}}{\partial \omega_{ij}} \quad (6.32)$$

$$\delta_{ip} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{ip}} \quad (6.33)$$

где δ_{ip} - восприимчивость состояния i -ого узла x_{ip} к E_p при вводе p -ого образца.

Учитывая (6.32) и (6.33), получим:

$$\frac{\partial E_p}{\partial \omega_{ij}} = \delta_{ip} I_{jp} \quad (6.34)$$

Расчет δ_{ip} при двух условиях:

1) Если i - выходной узел, т.е. $i = k$, тогда из уравнений (6.29) и (6.33)

следует:

$$\delta_{ip} = \delta_{kp} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{kp}} = \frac{\partial E_p}{\partial y_{kp}} \cdot \frac{\partial y_{kp}}{\partial x_{kp}} = -e_{kp} f'(x_{kp}) \quad (6.35)$$

Из уравнений (6.34) и (6.35) следует:

$$\frac{\partial E_p}{\partial \omega_{ij}} = -e_{kp} f'(x_{kp}) I_{jp} \quad (6.36)$$

2) Если i - не выходной узел, т.е. $i \neq k$, тогда уравнение (6.33) имеет следующий вид:

$$\delta_{ip} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{ip}} = \frac{\partial E_p}{\partial y_{ip}} \cdot \frac{\partial y_{ip}}{\partial x_{ip}} = \frac{\partial E_p}{\partial y_{ip}} \cdot f'(x_{ip}) \quad (6.37)$$

где

$$\frac{\partial E_p}{\partial y_{ip}} = \sum_{m_1} \frac{\partial E_p}{\partial x_{m_1 p}} \cdot \frac{\partial x_{m_1 p}}{\partial y_{ip}} = \sum_{m_1} \frac{\partial E_p}{\partial x_{m_1 p}} \cdot \frac{\partial \sum_j \omega_{m_1 j} I_{jp}}{\partial y_{ip}} = \sum_{m_1} \frac{\partial E_p}{\partial x_{m_1 p}} \cdot \omega_{m_1 i} = \sum_{m_1} \delta_{m_1 p} \cdot \omega_{m_1 i} \quad (6.38)$$

где m_1 - узел в слое после узла i ; I_{jp} - вход j -ого узла. При $i = j$, $y_{jp} = I_{jp}$. Подставив уравнения (6.37) и (6.38) в уравнение (6.34), получим:

$$\frac{\partial E_p}{\partial \omega_{ij}} = f(x_{ip}) I_{jp} \sum_{m_1} \frac{\partial E_p}{\partial x_{m_1 p}} \cdot \omega_{m_1 i} = f(x_{ip}) I_{jp} \sum_{m_1} \delta_{m_1 p} \cdot \omega_{m_1 i} \quad (6.39)$$

Уравнения (6.37) и (6.38) могут быть использованы для корректировки значений веса в уравнении (6.31).

Моделирование состояния ИИУС с учетом ряда факторов является сложной вычислительной задачей, однако, функция нелинейного отображения нейронной сети с обратным распространением ошибки позволяет учитывать сложные взаимосвязи между множеством параметров без необходимости проведения сложных по времени вычислений.

Нормирование входных параметров разработанной многослойной нейронной сети с обратным распространением ошибки осуществляется согласно:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min, i}}{x_{\max, i} - x_{\min, i}} \quad (6.40)$$

Для предотвращения перенасыщения нейронов для отображения используется только определенный диапазон r передаточной функции активации S -типа с большей кривизной (рис.6.9).

Исходя из вышеизложенного, уравнение (16) примет вид:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min,i}(1 + d_1)}{x_{\max,i}(1 + d_2) - x_{\min,i}(1 + d_1)} \quad (6.41)$$

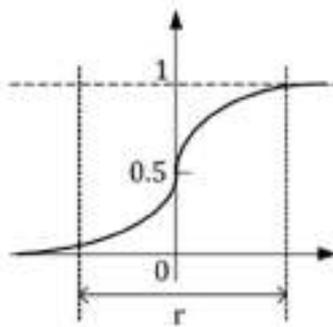
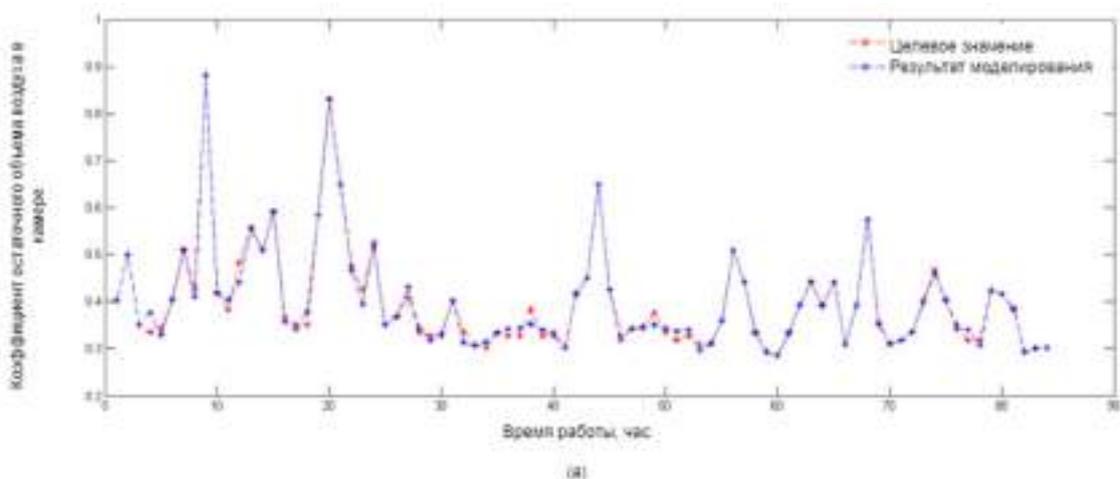


Рис.6.9. Передаточная функция S -образной активации с допустимым диапазоном.

На основе накопленных эксплуатационных данных нанолитографа, в целом, и вакуумной установки, в частности, произведено обучение разработанной нейронной сети. Результаты моделирования состояния ИИУС установкой нанолитографа и прогнозирования его изменения представлены на рисунке 6.10.



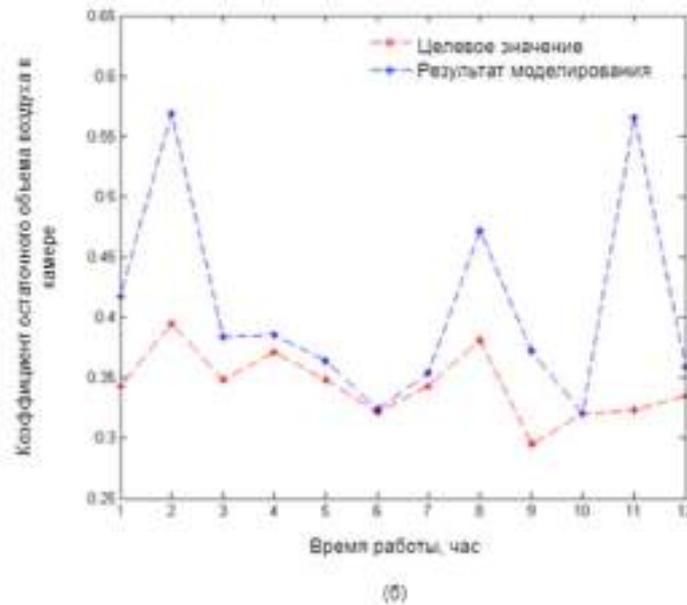


Рис.6.10. (а) - результат моделирования состояния ИИУС;
 (б) - результат прогнозирования изменения состояния ИИУС.

Исходя из вышеизложенного, уравнение (6.40) примет вид:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min,i} (1 + d_1)}{x_{\max,i} (1 + d_2) - x_{\min,i} (1 + d_1)} \quad (6.41)$$

Таким образом, разработанная модель состояния ИИУС установкой нанолитографа на основе многослойной нейронной сети с обратным распространением ошибки способна имитировать процесс изменения состояния ИИУС вакуумной установки с высокой эффективностью. По вопросам прогнозирования изменения состояния ИИУС разработанная модель способна отражать реляционные характеристики вакуумной установки. Расхождения прогнозных значений с целевыми объясняется недостаточным количеством данных о работе вакуумной установки. Кроме того, процесс управления вакуумной установкой является чрезвычайно сложным и зависит от множества факторов, оказывающих влияние. Разработанная модель состояния ИИУС вакуумной установки нанолитографа является приближенной и имеет множество параметров, определяемых эмпирически. Четыре фактора, выбранные в данном исследовании, являются необходимыми и наиболее значимыми, однако их недостаточно.

Исходя из вышеизложенного, разработанная модель состояния ИИУС установкой нанолитографа на основе нелинейной динамики и нейронной сети с обратным распространением ошибки позволяет учитывать взаимосвязь между различными внутренними и внешними параметрами оборудования, в том числе нелинейность.

Для моделирования состояния ИИУС и прогнозирования его изменения используются сложные дифференциальные уравнения с большим количеством эмпирических параметров. Для исследования взаимосвязи и нелинейности параметров, влияющих на состояние и поведение ИИУС использована модель нейронной сети с обратным распространением ошибки, поскольку данная модель позволяет эффективно обрабатывать сложные нелинейные расчеты. Четыре основных фактора, влияющих на управляемость ИИУС вакуумной установкой, определены на основе анализа математической модели нестационарного потока.

Результаты исследования показывают, что разработанная модель ИИУС позволяет отражать основные особенности изменения системы с учетом множества параметров. Хотя модель может быть улучшена при использовании большего количества данных, описанный подход к моделированию состояния ИИУС доказал свою состоятельность и эффективность.

Для оценки управляемости разработанной ИИУС для установки безмасочной рентгеновской нанолитографии на основе МЭМС - динамической маски для пластин диаметром 300 мм и производительностью не менее 0,1 пластины/час проведен эксперимент, который заключался в многократном изготовлении изделий путем нанолитографии. Эксперимент проводился с использованием и без использования смарт-компонента.

Совмещение и экспонирование элементов является одной из основных операций безмасочной рентгеновской нанолитографии с высокими требованиями по точности (не более 5 нм) и быстродействию (не более 1 мс). При использовании смарт-компонента время выполнения операции совмещения и экспонирования элементов соответствовало заявленным требованиям во всех

произведенных итерациях, в то время как без использования смарт-компонента – только в 5 из 50 (рис.6.11). Точность совмещения с использованием смарт-компонента выполнена в 50 итерациях из 50, без использования – в 31 из 50. Таким образом, управляемость ИИУС со смарт-компонентом для системы совмещения и экспонирования элементов выше на 48% по сравнению с традиционной.



Рис.6.11. Время выполнения операции совмещения и экспонирования элементов в процессе нанолитографии

При управлении работой вакуумной и оптической установки с использованием смарт-компонента произведено 2 отключения нанолитографа при выходе параметров из заданного диапазона, в 7 случаях произведена корректировка параметров установок. При традиционном управлении произведено 10 отключений, 2 из которых – ложные. Управляемость ИИУС с использованием смарт-компонента в данном случае выше на 16%. Выход годных изделий с использованием смарт-компонентом составил 50 пластин из 50, без использования – 32 из 50. Таким образом, общая управляемость процессом нанолитографии с помощью смарт-компонента на 36% выше традиционного способа.

6.4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ СРЕДОЙ ДЛЯ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ АРХИТЕКТУРЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ И МЕТОДОВ ИХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Планы Правительства РФ по развитию электронной промышленности подразумевают открытие дополнительных центров подготовки специалистов на базе образовательных организаций (далее ЦПС). Сеть ЦПС позволит усилить мощности проектирования микроэлектроники, что особенно важно в условиях повышения спроса на отечественную продукцию, согласно статистическим данным [259-261].

ЦПС реализует три составляющих – образовательную, научную и практическую, а также такие аспекты, как планирование и разработка всей цепочки электронной продукции, финансы, преподавание, администрирование и др. Усиление мощности проектирования микроэлектроники не может быть достигнуто исключительно с помощью технологий, политического регулирования или финансовых механизмов. Для этого требуется обеспечить качественное образование и обучение специалистов микроэлектроники на всех уровнях.

Образовательный процесс подготовки специалистов микроэлектроники должен включать не только изучение концепций и принципов разработки и проектирования изделий микроэлектроники, а также формировать навыки системного и критического мышления, позволяющие рассматривать производственные, исследовательские, образовательные и экономические аспекты в совокупности; установления партнерских отношений; принятия решений; понимания текущих возможностей микроэлектроники [262, 263]. Организация такого образовательного процесса подразумевает интеграцию и использования при обучении ресурсов, опыта и готовых проектов в области разработки и изготовления ЭКБ, печатных плат, фотошаблонов, элементов и изделий радиоэлектронной аппаратуры, прототипирования со стороны вендоров, партнеров, заказчиков, групп ученых. Это позволит повысить качество и эффективность

подготовки специалистов и созданию кадрового резерва в области микроэлектроники и является особенно актуальной задачей.

Для решения обозначенных выше проблем усиления мощности проектирования микроэлектроники и повышения эффективности обучения и компетентности обучаемых специалистов предлагается использовать специализированную ИИУС электронной лабораторной среды для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования (далее ИИУС ЭЛС) и описанной в работах [49, 52, 54, 57] системе организации доступа к накопленным гетерогенным распределенным информационным ресурсам (ИР). Система состоит из подсистем организации профилированных интерфейсов пользователей; поиска по коллекции ИР; оперативной доставки информации пользователю; реализации политики информационной безопасности и требований по разграничению прав доступа к информационным ресурсам и элементам интерфейса (рис.6.12). Смарт-компонент состоит из модулей по оценке квалификации специалистов; формированию рекомендаций по обучению; работе с кадровым резервом.

Средства управления доступом позволяют контролировать действия, которые субъекты (пользователи) могут выполнять над объектами доступа (информацией и другими компьютерными ресурсами) [42, 43, 46]. При реализации смарт-компонента ИИУС для управления образовательным процессом подготовки специалистов микро- и наноэлектроники затрагиваются вопросы логического управления доступом, которое, в отличие от физического управления доступом, реализуется программными средствами. Логическое управление доступом – это особый механизм, обеспечивающий конфиденциальность и целостность объектов определенными способами, например, путем запрещения обслуживания неидентифицированных пользователей [264]. Вся сложность логического управления доступом заключается в том, что само понятие объекта достаточно растяжимо. В рамках реализуемой ИИУС ЭЛС объектами считаем информационные ресурсы, элементы метаописания, операции и ин-

терфейсы (элементы интерфейсов) пользователей. Накопленными гетерогенными информационными ресурсами считаем проекты сотрудников, обучающихся; учебные и научные материалы; анкеты участников проекта; описания стартапов, заказов и предложений и подобное.



Рис.6.12. Общая схема системы организации доступа к накопленным гетерогенным ИР

Для реализации смарт-компонента в составе ИИУС ЭЛС в соответствии с разработанной в настоящей работе методикой построения ИИУС необходимо решить задачи:

1. Адаптация базовой модели представления информационных ресурсов к терминологии проекта создания электронной лабораторной среды.
2. Обеспечение разграниченного доступа пользователей к накопленным в ходе реализации проекта корпоративным информационным ресурсам, а

также к предоставляемым сервисам работы с системой.

3. Оперативное информирование участников проекта о прошедших и предстоящих мероприятиях.

4. Обеспечение взаимодействия участников проекта со специалистами и экспертами в области микро- и наноэлектроники.

Базовая модель представления информационного ресурса имеет иерархическую структуру и состоит из набора метаданных: названия поля из стандарта Dublin Core (DC) [49], значения его переименования, типа структуры и описания правила доступа (рис.6.12.).



Рис.6.13. Схема базовой модели представления информационного ресурса.

На основе параметризации и адаптации базовой модели представления информационного ресурса можно строить профилированные интерфейсы пользователей при работе с сервисами, такими, например, как публикация и поиск опубликованных ресурсов. Подключение к элементам интерфейса рубрикаторов (списков со значениями) позволяет использовать привычную для пользователя терминологию реальной предметной области в названиях элементов интерфейса. Использование правил доступа позволяют адаптировать структуру интерфейса к потребностям конечного пользователя, а также управлять ограничением потока информации, поступающей к потребителю ИР.

Для адаптации базовой модели представления ИР к терминологии электронной лабораторной среды необходимо:

1. Установить соответствия между названиями элементов стандарта Dublin Core и терминологией проектирования и подготовки специалистов микро- и нанoeлектроники, выявленной в результате онтологического анализа этой предметной области.

2. Определение элементов, представляемых в виде рубрикаторов.

3. Формирование перечня терминов предметной области деятельности для каждого из рубрикаторов.

Таким образом, адаптация базовой модели на терминологию проектирования и подготовки специалистов в области микро- и нанoeлектроники реализована в виде переименования названий элементов DC; подключения рубрикаторов, отображающих специфику предметной области; управления количеством элементов онтологической модели на основе метода разграничения доступа к элементам базовой модели. Настройка на онтологию предметной области позволяет формировать специализированные шаблоны представления информационных ресурсов и использовать их при построении профилированных интерфейсов пользователей электронной лабораторной среды для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования.

Компетентностный подход – это совокупность общих принципов определения целей образования, отбора содержания образования, организации образовательного процесса и оценки образовательных результатов [265]. Данный подход предполагает определение списка компетенций, которыми должен обладать специалист, получивший образование по какому-либо направлению подготовки. Оценить квалификацию специалиста можно по перечню сформированных компетенций. Набор компетенций определен в профессиональном стандарте.

Набор компетенций по направлению подготовки представляет собой совокупность элементов N :

$$N = \langle K, P, U, F, O_1, O_2, O_3, O_4 \rangle \quad (6.42)$$

K – множество формируемых компетенций из набора.

P – множество общих для всех направлений подготовки компетенций.

U – множество индикаторов сформированной компетенций, объединенных в списки {знания, умения, опыт деятельности}.

F – множество критериев сформированности компетенций. Элементы множества F представляют собой пары (k, f) , где k – компетенция, f – критерий сформированности.

O_1 – отношение $K \times U$. O_2 – отношение $K \times F$. O_3 – отношение $P \times U$. O_4 – отношение $P \times F$.

Отношения O_i имеют свойства:

1. $\forall k_i \in K \exists U_i \subset U: \forall u \in U_i \rightarrow (k_i, u) \in O_1 \equiv k_i O_1 u \wedge |U_i| \geq 1$. Отношение O_1 определяет принадлежность значений из множества K конкретным элементам множества U , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

2. $\forall k_i \in K \exists F_i \subset F: \forall f \in F_i \rightarrow (k_i, f) \in O_2 \equiv k_i O_2 f \wedge |F_i| \geq 1$. Аналогично, отношение O_2 определяет принадлежность значений из множества K конкретным элементам множества F , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

3. $\forall p_i \in P \exists U_i \subset U: \forall u \in U_i \rightarrow (p_i, u) \in O_3 \equiv p_i O_3 u \wedge |U_i| \geq 1$. Другими словами, отношение O_3 определяет принадлежность значений из множества P конкретным элементам множества U , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

4. $\forall p_i \in P \exists F_i \subset F: \forall f \in F_i \rightarrow (p_i, f) \in O_4 \equiv p_i O_4 f \wedge |F_i| \geq 1$. Отношение O_4 определяет принадлежность значений из множества P конкретным элементам множества F , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

5. $\forall u \in U \exists! k \in K: k O_1 u; \forall u \in U \exists! p \in P: p O_2 u$. Существует компетенция, связанная только с одним индикатором сформированной компетенций, объединенным в список {знания, умения, опыт деятельности} отношением O_1 . Во множестве P не существует элементов, не связанных отношением O_2 ни с

одним из индикаторов сформированной компетенции и, причем, каждая компетенция связана только с одним индикатором сформированной компетенции, объединенным в список {знания, умения, опыт деятельности}.

6. $\forall f \in F \exists! k \in K: k O_3 f; \forall f \in F \exists! p \in P: p O_4 f$. Аналогично, во множестве критериев сформированности компетенции F не существует значений, несвязанных отношением O_3 ни с одним из значений формируемых компетенций, кроме того, каждый критерий сформированности компетенции связан только с одной компетенцией. Для значения общей для всех направлений подготовки компетенции существует только один индикатор сформированности компетенции, связь определена отношением O_4 .

Аналогично получено математическое описание компетентности специалиста.

$$N^S = \langle K^S, P^S, U^S, Z, O_1^S, O_5, O_3^S, O_6 \rangle \quad (6.43)$$

K^S – множество формируемых в процессе обучения у специалиста компетенций, $K^S \subset K$.

P^S – множество общих для всех направлений подготовки формируемых у специалиста компетенций, $P^S \subset P$.

U^S – множество индикаторов сформированной компетенций, объединенных в списки {знания, умения, опыт деятельности}, $U^S \subset U$.

Z – результат формирования компетенции у специалиста. Элементы множества Z представляют собой пары (k^S, z) , где k^S – компетенция, z – результат формирования. Множество z состоит из одного элемента кортежа {сформирована, не сформирована}.

O_1^S – отношение $K^S \times U^S$. O_5 – отношение $K^S \times Z$. O_3^S – отношение $P^S \times U^S$.
 O_6 – отношение $P^S \times Z$.

Свойства отношений модели компетентности специалиста:

1. $O_1^S \subset O_1$. O_1^S представляет собой множество упорядоченных пар (k^S, u^S) , а O_1 – (k, u) . Так как $K^S \subset K$ и $U^S \subset U$, значит и $\forall k^S \in K^S \rightarrow k^S \in K$, $\forall u^S \in U^S \rightarrow u^S \in U$. Кроме того, соответствующие свойства k^S и k , u^S и u

равны. Тогда получаем, что соответствующие пары (k^S, u^S) и (k, u) равны между собой, а значит $O_1^S \subset O_1$.

2. $\forall k_i^S \in K^S \exists Z_i \subset Z: \forall z \in Z_i \rightarrow (k_i^S, z) \in O_5 \equiv k_i O_5 z \wedge |Z_i| \geq 1$. Отношение O_5 определяет принадлежность значений из множества K^S конкретным элементам множества Z , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

3. $O_3^S \subset O_3$. O_3^S представляет собой множество упорядоченных пар (p^S, u^S) , а $O_3 - (p, u)$. Так как $P^S \subset P$ и $U^S \subset U$, значит и $\forall p^S \in P^S \rightarrow p^S \in P$, $\forall u^S \in U^S \rightarrow u^S \in U$. Кроме того, соответствующие свойства p^S и p , u^S и u равны. Тогда получаем, что соответствующие пары (p^S, u^S) и (p, u) равны между собой, а значит $O_3^S \subset O_3$.

4. Поскольку, $O_1^S \subset O_1$ и $O_3^S \subset O_3$, отношения O_1^S и O_3^S обладают теми же свойствами, что и отношения O_1 и O_3 .

5. $\forall p_i^S \in P^S \exists Z_i \subset Z: \forall z \in Z_i \rightarrow (p_i^S, z) \in O_6 \equiv p_i O_6 z \wedge |Z_i| \geq 1$. Отношение O_6 определяет принадлежность значений из множества P^S конкретным элементам множества Z , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

6. $\forall z \in Z \exists! k^S \in K^S: k^S O_5 z; \forall z \in Z \exists! p^S \in P^S: p^S O_6 z$. Существует сформированная у специалиста компетенция, связанная только с одним результатом сформированной компетенций отношением O_5 . Во множестве P^S не существует элементов, не связанных отношением O_6 ни с одним из результатов сформированной компетенции и, причем, каждая компетенция связана только с одним результатом сформированной компетенции.

Математическое описание набора компетенций, которыми должен обладать специалист для решения практической задачи, имеет вид:

$$S = \langle R, P^S, V, O_7, O_8 \rangle \quad (6.44)$$

R – множество компетенций, необходимых для решения задачи.

P^S – множество общих для всех направлений подготовки компетенций, необходимых для решения задачи.

V – множество индикаторов сформированной компетенций, объединенных в списки {знания, умения, опыт деятельности}, множество V формируется из элементов множества U для различных направлений подготовки.

O_7 – отношение $R \times V$. O_8 – отношение $P^S \times V$.

Отношения O_7 и O_8 обладают свойствами:

1. $\forall r_i \in R \exists v_i \subset V: \forall v \in V_i \rightarrow (r_i, v) \in O_7 \equiv r_i O_7 v \wedge |V_i| \geq 1$. Отношение O_7 определяет принадлежность значений из множества компетенций, необходимых для решения практической задачи, R конкретным элементам множества индикаторов сформированных компетенций V , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

2. $\forall p_i^S \in P^S \exists v_i \subset V: \forall v \in V_i \rightarrow (p_i, v) \in O_8 \equiv p_i O_8 v \wedge |V_i| \geq 1$. Аналогично, отношение O_8 определяет принадлежность значений из множества общих для всех направлений подготовки компетенций P^S конкретным элементам множества индикаторов сформированных компетенций V , причем каждому элементу (свойству) соответствует хотя бы одно значение.

3. $\forall v \in V \exists! p^S \in P^S: p^S O_7 v; \forall v \in V \exists! p^S \in P^S: p^S O_8 v$. Во множестве индикаторов сформированной компетенции V не существует значений, несвязанных отношением O_7 ни с одним из значений формируемых компетенций, кроме того, каждый критерий сформированности компетенции связан только с одной компетенцией. Для значения общей для всех направлений подготовки компетенции существует только один индикатор сформированности компетенции, связь определена отношением O_8 .

На основе сравнения моделей N и N^S с использованием графового представления, приведенного в Главе 5 настоящей диссертационной работы, и основных положений нечеткой логики (5.11) и (5.13) вычисляется оценка квалификации специалиста и формируются рекомендации в виде индивидуальной траектории повышения квалификации. Аналогично, на основе графового представления N^S и S и основных положений нечеткой логики (5.11) и (5.13) делается вывод о соответствии специалиста занимаемой должности, а также

выборка специалистов требуемой квалификации из кадрового резерва.

Во всех моделях присутствуют множества K , P , U или множества, формируемые на их основе. На основе анализа свойств полученных моделей следует, что набор компетенций направления подготовки, описание компетентности специалиста и набор компетенций для решения практической задачи связаны посредством K , P , U . Полученный вывод используется при разработке алгоритмов поиска специалистов, практических задач (заказов) и формирования кадрового резерва по определенному набору компетенций, используемых в разрабатываемой ИИУС электронной лабораторной среды для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования.

На основе онтологического анализа работы ЦПС сформированы элементы пользовательских интерфейсов. Описание одного из интерфейсов представлено в таблице 6.1. Кроме того, сформированы роли пользователей: участник проекта, член дирекции проекта, член координационного совета проекта, менеджер проекта, партнер, обучающийся.

Таблица 6.1. Элементы интерфейса поиска ИР.

Наименование элемента шаблона (наименование DC)	Тип элемента	Значения рубрикатора
Тип ресурса (type)	Рубрикатор	Заявка Договор Приложения к договору Отчет по мероприятиям Отчет по повышению квалификации Форма отчетов Закупка Назначенные задания

Наименование элемента шаблона (наименование DC)	Тип элемента	Значения рубрикатора
		УИР Приказ Положение Служебное письмо Служебная записка План Презентация Рабочие материалы Требования к материалам Регламент Персоналии Схема Распоряжение
Аудитория (audience)	Рубрикатор	Для дирекции проекта Для координационного совета проекта Для участников программы
Руководитель (ответственный исполнитель) (creator)	Рубрикатор	Все руководители проекта по направлениям
Категория документа (rights)	Рубрикатор	Внешний Внутренний
Статус (coverage)	Рубрикатор	Принудительная рассылка Информационный материал
Название (title)	Текст	-
Номер (relation)	Текст	-
Дата утверждения	Дата	-

Наименование элемента шаблона (наименование DC)	Тип элемента	Значения рубрикатора
(created)		
Штрих-код (identifier)	Текст	-
Формат ресурса (format)	Рубрикатор	Архив ZIP Архив RAR Аудио, Видео Документ Word Документ PDF Изображение Материалы на электронных носителях Печатные издания Презентация PowerPoint Программа Смешанный Текст Текст HTML
Примечание (abstract)	Текст	-

На основе разработанных шаблонов для представления ИР получены профилированные интерфейсы пользователей: поисковые и доставочные. Описан механизм обмена информационными ресурсами между всеми участниками проекта на основе заранее созданного плана работ. Описан подход, предоставляющий пользователю необходимый ему набор сервисов и профилированных интерфейсов без дополнительной идентификации и авторизации.

Доступ к интерфейсам ИИУС ЭЛС осуществляется через Портал информационного сопровождения электронной лабораторной среды для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и мето-

дов их программирования, который делится на две области: внешнюю и внутреннюю (рис.6.14).



Рис.6.14. Схема внешней области портала информационного сопровождения

Внешняя область одинакова для всех пользователей, входящих на портал. Здесь доступны внешние информационные ресурсы по управлению ИИУС ЭЛС, внешние отчеты о ходе выполнения образовательного процесса, информация по реализации и мониторингу образовательного процесса, а также информация о предстоящих и прошедших мероприятиях.

Для доступа к накопленным гетерогенным информационным ресурсам в ИИУС ЭЛС используется поисковый профилированный интерфейс, построенный на основе производного шаблона представления информационных ресурсов. Производный шаблон состоит из элементов: «Тип», «Аудитория», «Категория документа», «Руководитель (ответственный исполнитель)», «Название». Причем рубрикаторы «Тип» и «Руководитель (ответственный исполнитель)» содержат только те значения, по которым присутствуют ресурсы в системе (рис.6.15). Значения рубрикаторов «Аудитория» и «Категория документа» заданы по умолчанию, соответственно, «Для всех» и «Внешний», и в профилированном поисковом интерфейсе пользователя эти рубрикаторы не присутствуют [49].

Пример построения элемента интерфейса «Тип ресурса» описан в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Элемента «Тип ресурса» шаблона представления ИР

T, DC	Тип	R
Тип ресурса (type) t_1, dc_8	Рубрикатор	r_1 - Заявка r_2 - Договор r_3 - Приложения к договору r_4 - Отчет по мероприятиям r_5 - Отчет по повышению квалификации r_6 - Форма отчетов r_7 - Закупка r_8 - Назначенные задания r_9 - УИР r_{10} - Приказ r_{11} - Положение r_{12} - Служебное письмо r_{13} - Служебная записка r_{14} - План r_{15} - Презентация r_{16} - Рабочие материалы r_{17} - Требования к материалам r_{18} - Регламент r_{19} - Персоналии r_{20} - Схема r_{21} - Распоряжение

Алгебраическая система S^P для этого элемента шаблона представления накопленных гетерогенных информационных ресурсов будет иметь вид $S^P =$

$\langle \{t_1\}, \{r_1 - r_{21}\}, \{dc_8\}, \{t_1, \{r_1 - r_{21}\}\}, \{t_1, dc_8\} \rangle$. Согласно представленному в [49] методу построения профилированных интерфейсов пользователей, выберем событие, которое станет корнем дерева. Таким событием будет обработчик dc_8 . Далее, в соответствии с разработанной в настоящей диссертационной работе методики декомпозиции ИИУС, для каждой вершины дерева $s \in L_{n-1} : M_1s \neq \emptyset$ необходимо добавить элементы последовательности M_1s . $M_1dc_8 = \{t_1\}$, $M_1t_1 = \{R_1\}$, $M_1R_1 = \emptyset$. Построенный элемент «Тип ресурса» профилированного поискового интерфейса представлен на рис.6.15.

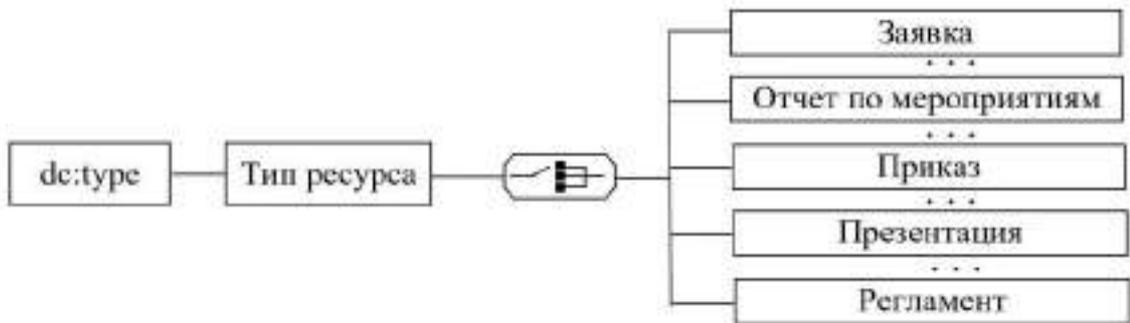


Рис.6.15. Рубрикатор «Тип ресурса» для профилированного поискового интерфейса «Информационные ресурсы по проекту»

Для быстрого доступа к внешним отчетам по ИИУС ЭЛС используется профилированный доставочный интерфейс, сформированный на основе разработанного доставочного шаблона представления накопленных гетерогенных информационных ресурсов. В качестве значений элементов этого доставочного шаблона заданы следующие параметры: «Тип ресурса» - «Отчеты по мероприятиям», «Категория документа» - «Внешний».

Внутренняя часть портала доступна только для участников образовательного процесса подготовки специалистов по архитектуре отечественных микроконтроллеров и методов их программирования. Для перехода к внутренней части портала информационного сопровождения ИИУС ЭЛС участники проекта должны пройти идентификацию по IP-адресам своих рабочих персо-

нальных компьютеров. Если IP-адрес компьютера по каким-то причинам определить не удалось или IP-адрес не зарегистрирован в системе, то участнику образовательного проекта для доступа к внутренней части портала ЦПС предлагается ввести имя пользователя и пароль для последующей его идентификации и авторизации на портале. Кроме внешних информационных ресурсов на внутренней части портала ЦПС (рис.6.16) доступны и внутренние ИР: рабочие материалы, приказы, презентации, отчеты, - а также представлена информация о внутренних предстоящих и прошедших мероприятиях.



Рис.6.16. Структурная схема внутренней области портала ЦПС

Для доступа к информационным ресурсам из внутренней области портала по информационному сопровождению ИИУС ЭЛС для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования используется профилированный поисковый интерфейс, построенный на основе производного шаблона представления ИР. В профилированном интерфейсе присутствуют такие элементы: «Тип», «Аудитория», «Руководитель (ответственный исполнитель)», «Название». Элемент «Категория документа», несмотря на то, что присутствует в шаблоне представления ИР, в интерфейсе не отображается, поскольку имеет только одно значение, заданное по умолчанию – «Внутренний». Рубрикатор «Тип» содержит только те значения, которым соответствуют описания накопленных в системе ИР.

Доступ к внутренним приказам по ЦПС осуществляется на основе профилированного доставочного интерфейса пользователя. Доставочный шаблон, используемый при формировании данного профилированного интерфейса, содержит параметры поиска: «Тип ресурса» - «Приказ», «Категория документа» - «Внутренний».

Отчеты по проекту доступны участникам образовательного процесса по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования через профилированный поисковый интерфейс. Данный интерфейс включает в себя следующие элементы: «Аудитория», «Руководитель (ответственный исполнитель)», «Направление обучения» и «Название». Элементы «Тип ресурса» и «Категория документа» в интерфейсе пользователя не отображаются, но имеют заданные по умолчанию значения: «Отчеты по мероприятиям» и «Внутренние».

Во внутренней области портала информационного сопровождения ИИУС ЭЛС для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования располагается вход в рабочую зону ЦПС, которая делится на учебный блок, Центр формирования компетенций (ЦФК), управление ЦПС и научный блок (рис.6.17).



Рис.6.17. Структурная схема рабочей зоны ЦПС

Для доступа к накопленным гетерогенным информационным ресурсам

разделов «ЦФК» и «Научный блок» подключены профилированные поисковые интерфейсы, построенные с учетом всех потребностей конечных пользователей данных разделов. «Учебный блок» состоит из «Внедрения в учебный процесс», «ЭМИРС», «Библиотека преподавателя», «Библиотека студента». «Внедрение в учебный процесс» представляет собой вход в систему поддержки процесса обучения. Каждому учебному центру в этой системе выделено свое рабочее пространство, состоящее из учебной области и библиотеки (рис.6.18). Учебная область включает в себя функционал по работе с учебным планом, электронными модулями индивидуальной работы студентов (ЭМИРС), отправкой/получением домашних работ студентами и преподавателями и др.

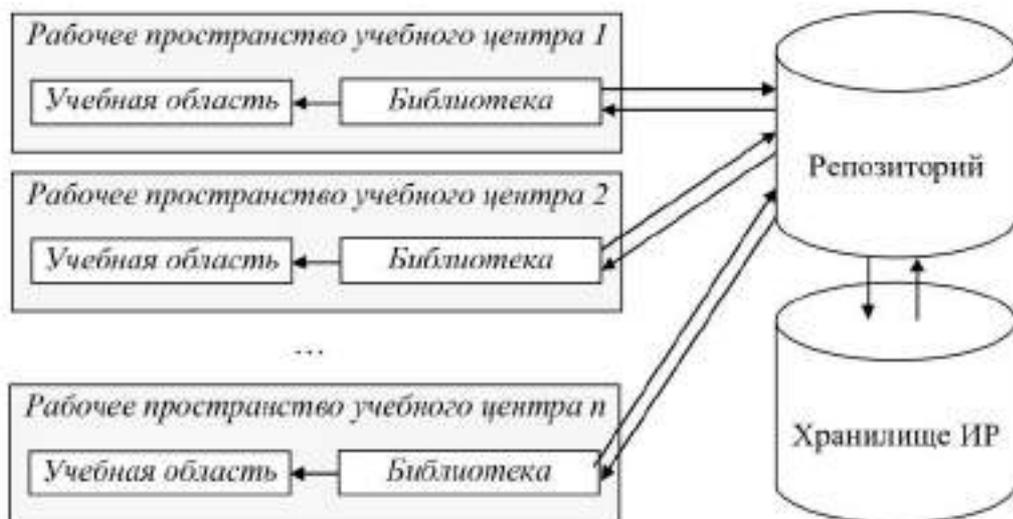


Рис.6.18. Схема организации рабочего пространства учебного центра

Отправка и получение домашних работ студентами и преподавателями реализована через специальные профилированные интерфейсы [49, 266]. Профилированный интерфейс обучающегося по отправке домашних работ состоит из элементов «Название дисциплины», «Название занятия», «Тип работы», «Преподаватель». К каждому из этих элементов подключен рубрикатор. Причем, рубрикаторы «Название дисциплины», «Название занятия» и «Преподаватель» формируются в соответствии с учебным планом, который

создается заранее. Таким образом, каждый обучающийся в своем профилированном интерфейсе получает только те значения дисциплин и занятий, по которым у него на текущий момент времени запланирована отправка на проверку результатов самостоятельной работы.

Профилированный интерфейс по отправке проверенных домашних работ преподавателем состоит из элементов «Название дисциплины», «Название занятия», «Группа», «Обучающийся», «Общие указания», «Рекомендации по исправлению ошибок», «Оценка». Аналогично профилированному интерфейсу обучающегося, к каждому из этих элементов подключены рубрикаторы. Причем значения рубрикаторов «Название дисциплины» и «Название занятия» состоят только из тех наименований дисциплин, по которым преподаватель проводит занятия в текущий момент. А рубрикаторы «Группа» и «Обучающийся» - только из тех обучающихся, с которыми преподаватель работает в данный момент.

Применение рубрикаторов в подобных профилированных интерфейсах позволяет не только уменьшить время отправки и получения домашних работ, но и позволяет избежать многих ошибок. Поскольку пользователю не требуется вводить данные, а предлагается выбрать уже из имеющихся.

В профилированном интерфейсе преподавателя по получению выполненных домашних работ добавлена функция «Быстрый доступ к непроверенным работам». Данная функция позволяет получать непроверенные работы по всем дисциплинам и всех студентов, адресованные данному преподавателю. Необходимость в такой функции была выявлена в результате онтологического анализа реальной практической деятельности получения контрольной работы обучающегося преподавателем. Данная функция позволила существенно сократить временные затраты преподавателя на работу в системе при получении контрольных работ на проверку. Проведя статистические исследования действий преподавателя по получению выполненной домашней работы, было получено, что преподаватель для получения одной домашней работы одного обучающегося в среднем делает 10 кликов (щелчков) мышью. Это – выбор пункта

меню «Получение ДР», выбор значений рубрикаторов «Название дисциплины», «Название занятия», «Тип работы», «Группа», «Обучающийся», нажатие кнопки «Искать», выбор работы, просмотр описания работы и ее открытие. С использованием кнопки «Быстрый доступ к непроверенным работам» для той же самой операции преподаватель совершает 5 кликов мышью: выбор пункта меню «Получение ДР», нажатие кнопки «Быстрый доступ к непроверенным работам», выбор работы, просмотр ее описания и открытие. Очевидно, что получение одной домашней работы с использованием функции «Быстрый доступ к непроверенным работам» быстрее в 2 раза. Также было проведено статистическое исследование по получению одним преподавателем n работ по d дисциплинам, z занятия, k обучающимся из g групп и по v типам работ. Пусть t – время одного клика мышью. С учетом того, что значения всех рубрикаторов зависят от значения рубрикатора «Название дисциплины», а значения рубрикатора «Обучающийся» также зависят от выбранного значения в рубрикаторе «Группа» получим следующее время T_1 для проверки работ $T_1 = dzvgkt + d(t + z(t + v(t + +g(t + k(t + t)))))) + n(t + t + t)$.

Для выполнения той же операции, но с помощью функции быстрого доступа к непроверенным работам преподавателям потребовалось затратить время T_2 . При проведении исследования была выявлена зависимость времени поиска работ при едином поисковом запросе от количества найденных работ. Проанализировав статистические данные сервера: количество обращений пользователей, время обработки запросов и т.д., - был получен корректирующий коэффициент зависимости времени поиска от количества работ, т.е. время поиска контрольных работ увеличивается на $1,46n$, где n – количество найденных работ, $T_2 = t + t + n(t + t + t) + 1,46nt$.

Для получения количественного значения отношения T_1/T_2 определены средние значения входящих в формулы коэффициентов. $d = 4$, $z = 2$, $v = 1$,

$g = 3$, $k = 60$, $r = 200$. $T_1 = 4964t$, $T_2 = 1496t$, $\frac{T_1}{T_2} = 3,3$. Таким образом, использование профилированных пользовательских элементов, структура которых адаптирована к терминологии образовательного процесса по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования, позволило сократить в 3,3 раза временные затраты преподавателя на получение контрольных работ для проверки.

Работая с библиотекой, можно осуществлять загрузку информационных ресурсов, их поиск, просмотр метаописаний и т.д. Информационные ресурсы, загруженные в библиотеку, могут подключаться к учебному плану и использоваться в качестве основного или дополнительного материала при изучении дисциплины обучающимися. Все информационные ресурсы, накапливаемые учебными центрами в процессе работы, размещаются в едином информационном хранилище (рис.6.18). Но, несмотря на это, сотрудники каждого учебного центра будут иметь доступ только к «своим» ресурсам. Такой эффект достигается путем настройки прав к элементам шаблона представления накопленных гетерогенных информационных ресурсов и организации персональных профилированных интерфейсов пользователей для каждого сотрудника центра. Для быстрого доступа к информационным ресурсам библиотеки, как для преподавателей, так и для студентов, используются входы на странице учебного блока «Библиотека преподавателя» и «Библиотека студента» соответственно (рис.6.17).

При работе с библиотекой широко используются профилированные интерфейсы пользователей. Эти интерфейсы строятся на основе базового шаблона для представления учебных ИР, разработанного на основе онтологического анализа учебной предметной деятельности образовательной организации. Например, для рубрикатора «Тип ресурса» (DC элемент – «type») были выбраны только те значения, которые используются в реальном учебном процессе и соответствующие им электронные версии присутствуют в библиотеке (рис.6.19 а). Важное значение имеет рубрикатор «Аудитория» (DC элемент –

«audience») (рис.6.19 б), который используется для определения целевой аудитории предназначенности ИР.

К разделу учебного блока «ЭМИРС» подключен доставочный профилированный интерфейс для быстрого и удобного доступа преподавателей и методистов ЦПС к организационно-распорядительным документам по созданию и использованию электронных модулей индивидуальной работы обучающихся, а также примерам самих модулей.

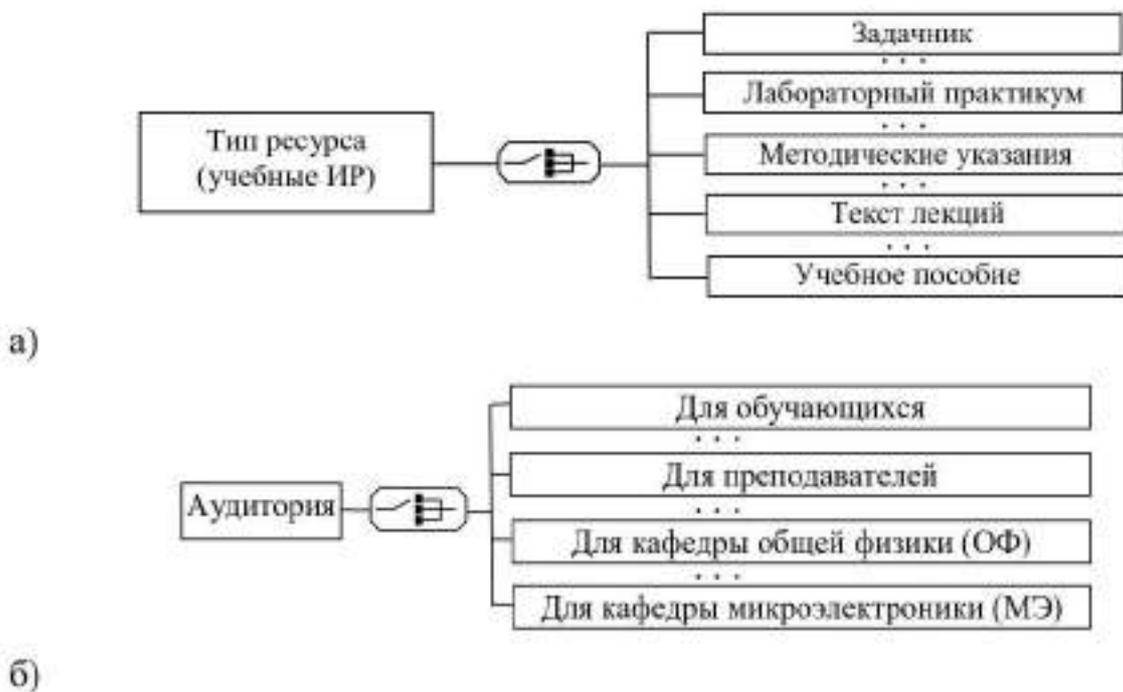


Рис.6.19. Рубрикаторы базового шаблона для представления учебных ИР.

Раздел «Управление проектом ЦПС» рабочей области представляет собой вход в ИИУС электронной лабораторной среды для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования. В результате онтологического исследования проектирования микроэлектроники, проведенного на основе анализа различных организационно-распорядительных документов по проекту, выявлены следующие роли и группы пользователей:

1. Координационный совет образовательного процесса.

2. Дирекция образовательного процесса подготовки специалистов по архитектуре отечественных микроконтроллеров и методов их программирования.

3. Руководители (ответственные исполнители) основных задач образовательного процесса.

4. Руководители (ответственные исполнители) направлений (мероприятий), выделенных в рамках основных задач образовательного процесса подготовки специалистов по архитектуре отечественных микропроцессоров и методов их программирования.

5. Участники проекта (подразделения).

В ИИУС ЭЛС организовано взаимодействие пользователей (или обмен информационными ресурсами в рамках системы) (рис.6.20):

1. Пользователи группы «Координационный совет проекта» в рамках системы могут взаимодействовать между собой, а также с членами дирекции образовательного процесса подготовки специалистов по архитектуре отечественных микропроцессоров и методов их программирования.

2. Члены дирекции образовательного процесса подготовки специалистов по архитектуре отечественных микропроцессоров и методов их программирования обмениваются ресурсами между собой, а также с координационным советом процесса и руководителями основных задач.

3. Руководители основных задач взаимодействуют между собой, а также с членами дирекции проекта и руководителями направлений по своей задаче.

4. Руководители направлений по каждой из задач, помимо обмена ресурсами с руководителями основных задач, могут обмениваться ресурсами и с участниками проекта (сотрудниками подразделения).

5. Участники образовательного процесса подготовки специалистов по архитектуре отечественных микропроцессоров и методов их программирования передают и получают ресурсы от сотрудников своего подразделения и от руководителей своего направления.

Кроме обмена информационно-распорядительными и рабочими информационными ресурсами, ИИУС ЭЛС подразумевает и обмен результатами работы. Обмен результатами работы основан на заданиях плана реализации проекта ЦПС по направлению. Такой план назначается на группу участников образовательного процесса подготовки специалистов по архитектуре отечественных микроконтроллеров и методов их программирования (подразделение) и, согласно прописанным в нем заданиям (отчетным мероприятиям), участник проекта передает своему руководителю свой результат работы, который руководитель может принять или отклонить.

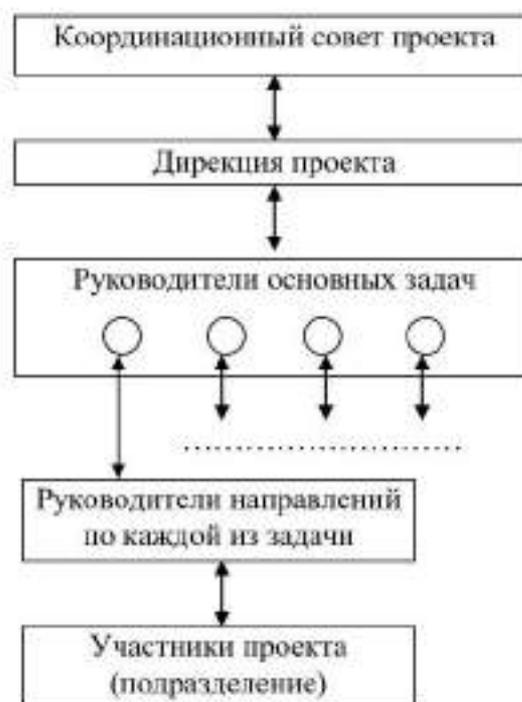


Рис.6.20. Взаимодействие пользователей в рамках ИИУС ЭЛС

Каждый из участников реализации проекта ЦПС в рамках ИИУС ЭЛС для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микропроцессоров и методов их программирования получил свой профилированный интерфейс как для загрузки/поиска организационно-распорядительных и рабочих гетерогенных информационных ресурсов, так и для отправки/получении результатов проделанной работы. Профилированность интерфейса пользователя

заключается в ограничении доступа к элементам рубрикаторов: «Руководитель (ответственный исполнитель)», «Тип», «Аудитория», «Категория документа», «Статус». Ограничение доступа производится на основе анализа конкретных задач и направления деятельности участника проекта.

Применение разработанной и описанной в данной работе специализированной ИИУС электронной лабораторной средой для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования позволило существенно упростить доступ участников образовательного процесса к накапливаемым в ходе реализации гетерогенным информационным ресурсам, а также к предоставляемым сервисам работы с системой. Благодаря адаптации элементов интерфейсов и метаописаний ИР к терминологии проекта, а также сужению информационных потоков, поступающих к участникам проекта, удалось увеличить эффективность их работы с необходимыми ему ресурсами. В рамках ИИУС ЭЛС реализована простая и удобная схема обмена информационными ресурсами между всеми участниками образовательного процесса, благодаря использованию смарт-компонента. Профилированные интерфейсы пользователей в составе разработанного смарт-компонента также позволили быстро и эффективно получать руководителями задач и направлений результаты проделанной работы в виде отчетов от участников реализации образовательного процесса.

Объединение в одной ИИУС ЭЛС с использованием смарт-компонента организационного, управляющего и обучающего блоков позволило повысить не только эффективность работы участников образовательного процесса, но и их мотивацию по использованию новой информационной системы со смарт-компонентом.

Текущая мировая ситуация подталкивает к удаленному взаимодействию участников образовательного процесса. Это необходимо учитывать при разработке ИИУС ЭЛС. Стоит предусмотреть отдельный функциональный блок, обладающий основными возможностями социальной сети: обмен личными сообщениями, создание сообществ, организация дискуссий и конференций. Это

позволит создать условия для коммуникации участников образовательного процесса в единой среде. Поскольку использование различных мессенджеров, средств онлайн-связи, социальных сетей и электронной почты требует дополнительных усилий по структуризации, классификации и обработки поступающей информации.

Использование специализированной ИИУС ЭЛС для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров с применением смарт-компонента позволило повысить эффективность обучения специалистов в области микро- и наноэлектроники за счет интеграции и внедрения в учебный процесс ресурсов, опыта и готовых проектов в области разработки и изготовления ЭКБ, печатных плат, фотошаблонов, элементов и изделий радиоэлектронной аппаратуры, прототипирования со стороны вендоров, партнеров, заказчиков, групп ученых на базе ЦПС проектирования микроэлектроники. Кроме этого, организация взаимодействия в системе между всеми участниками образовательного процесса позволяет развить и усилить горизонтальные связи между ними.

Для оценки управляемости разработанной ИИУС ЭЛС для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования проведен эксперимент, который заключался в подборе программы повышения квалификации для сотрудников производства и подборе кадров по имеющимся вакансиям.

Случайным образом выбрана экспериментальная группа сотрудников из 100 человек, квалификация которых исследовалась с помощью разработанной ИИУС ЭЛС и традиционными методами (таблица 6.3).

Таблица 6.3. Фрагмент результатов исследования квалификации обучающихся

№ п/п	Сформированные компетенции	Требуемые компетенции	Недостающие компетенции		Компетенции ППК	
			Смарт-компонент	Традиционные методы	Смарт-компонент	Традиционные методы

1	2	3	4	5	6	7
1	ОПК-4, ОПК-6, ПК-3, ПК-5, ПК-7	ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОПК-6, ПК-2, ПК-3, ПК-5, ПК-7	ОПК-3, ПК-2	ПК-1	ОПК-1, ОПК-3, ПК-2	ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-5, ПК-7
2	ОПК-3, ОПК-4, ОПК-6, ПК-1, ПК-5, ПК-7	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-4, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-5, ПК-7	ОПК-1, ОПК-2, ПК-2, ПК-3	ОПК-1, ПК-3	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3	ПК-1, ПК-2
3	ОПК-4, ОПК-6, ПК-3, ПК-7	ОПК-4, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-7	ПК-1, ПК-2, ПК-4, ПК-5	ОПК-2, ПК-1, ПК-2	ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-5, ПК-7	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3
4	ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-5, ПК-7	ОПК-1, ОПК-4, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-5, ПК-7	ОПК-4	ОПК-4	ОПК-3, ОПК-4	ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-5, ПК-7
5	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-4, ОПК-6, ПК-	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-4, ОПК-6, ПК-	ПК-1	-	ОПК-1, ПК-1	-

3, ПК-5, ПК-7	1, ПК-2, ПК-3, ПК-5				
------------------	------------------------	--	--	--	--

В результате эксперимента для 100 сотрудников с помощью смарт-компонента выявлена 201 недостающая компетенция, традиционным способом – 154, что в 1,3 раза меньше. Совпадение в выборе программ повышения квалификации с помощью смарт-компонента составило 99 случаев из 100 ожидаемых, традиционным способом – 16, что на 83% меньше.

Аналогично для 20 исследуемых вакансий предприятия отобрано 17 наиболее подходящих кандидатов с помощью смарт-компонента и 9 традиционным способом. Таким образом, управляемость ИИУС в части подбора кадров с помощью смарт-компонента на 39% выше традиционного способа.

Разработанный и реализованный смарт-компонент для управления подготовкой специалистов в составе ИИУС ЭЛС позволил на 83% повысить управляемость системы в части подбора программ повышения квалификации сотрудниками предприятия; на 39% - управляемость в части подбора кадров по сравнению с традиционными методами.

6.5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Оценка эффективности полученных результатов диссертационной работы производилась с использованием теории полезности [267, 268]. В основе теории полезности лежит функция полезности, с помощью которой можно представить предпочтения на множестве допустимых альтернатив. Функция полезности $u: X \rightarrow \mathbb{R}$ на множестве допустимых альтернатив X с условием предпочтения $x \succeq y \Leftrightarrow u(x) \geq u(y), x, y \in X$ имеет большее значения для наиболее предпочтительной альтернативы.

Для решения задачи определения максимальной полезности введем

ограничение на выбор альтернативы в виде неравенства $P \cdot X \leq R$, где P – уровень достижения цели с помощью соответствующей альтернативы, X – вектор альтернатив и R – предполагаемая цель. Тогда задача заключается в максимизации полезности на заданном ограничении.

$$\begin{cases} u(x) \rightarrow \max \\ px \leq R \\ x \in X \end{cases} \quad (6.45)$$

В качестве альтернатив предлагается использовать модели ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники, полученные в настоящей диссертационной работе, и существующие модели ИИУС. Целью является получение модели ИИУС производственным процессом для микро- и наноэлектроники, учитывающей все ее характеристики и позволяющей прогнозировать изменение ее состояния. Для удобства расчетов цель разбита на ряд задач:

- разработка концептуальной модели ИИУС производственным процессом с учетом всевозможных состояний и исключений;
- разработка обобщенной математической модели ИИУС производственным процессом, учитывающая все состояния системы;
- разработка математической модели компонента ИИУС производственным процессом;
- управление устойчивостью ИИУС производственным процессом;
- разработка математической модели граничных состояний ИИУС производственным процессом;
- описание взаимодействия ИИУС;
- анализ и прогноз динамики состояния ИИУС производственным процессом;
- принятие решения в условиях неопределенности внешней среды.

Уровень достижения цели получен в результате экспериментальных исследований. Теория полезности предполагает использование числовых параметров, в связи с чем уровням достижения цели присвоены относительные

числовые значения (таблица 6.4). Максимальный уровень достижения цели равен 10.

Таблица 6.4. Цели и уровни достижения для альтернатив

	Цели	Полученные результаты	Существующие решения
1	Концептуальная модель ИИУС с учетом всевозможных состояний и исключений	10	7
2	Математическая модель ИИУС, учитывающая все состояния	10	6
3	Математическая модель компонента ИИУС	10	8
4	Управление устойчивостью ИИУС	10	4
5	Математическая модель граничных состояний ИИУС	10	3
6	Описание взаимодействия ИИУС	10	4
7	Анализ и прогноз динамики состояния ИИУС	10	4
8	Принятие решения в условиях неопределенности внешней среды	10	3

Таким образом, при использовании полученных результатов настоящей диссертационной работы для достижения цели: получение модели ИИУС, учитывающей все ее характеристики и позволяющей прогнозировать изменение его состояния, - составляет 80 относительных единиц, полученных экспериментально. А с использование существующих решений – 39 относительных единиц. Таким образом, эффективность полученных решений составляет $\frac{80-39}{80} \times 100\% = 51\%$.

Решение задачи максимизации полезности позволяет определить, что

применение полученных в настоящей диссертационной работе теоретических основы и принципов построения ИИУС, позволяющих учитывать нелинейные факторы системы, обеспечивать ее адаптивность, управляемость и устойчивость в состоянии хаоса, - эффективнее на 51% по сравнению с существующими методами, моделями и средствами представления ИИУС.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

1. Описана практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы производственной линией изготовления микроэлектронных компонентов на кремниевых пластинах 20 мм. Получено распределение вероятностей состояний ИИУС производственной линией как функции времени, распределение времени пребывания ИИУС в возможных состояниях в стационарном режиме. Представленные результаты позволяют принимать эффективные и качественные решения на всех уровнях управления производством.

2. Произведена практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы контроля поверхностных дефектов изделий микроэлектроники. Разработанная ИИУС позволяет корректировать параметры, влияющие на качество изображения, путем включения в контур управления нейронной сети на основе перцептрона.

3. Представлена практическая реализация и произведена оценка управляемости информационно-измерительной и управляющей системы процесса нанолитографии. Управляемость ИИУС со смарт-компонентом для системы совмещения и экспонирования элементов выше на 48% по сравнению с традиционной. Управляемость ИИУС с использованием смарт-компонента для вакуумной установки выше на 16%. Выход годных изделий с использованием смарт-компонентом составил 50 пластин из 50, без использования – 32 из 50. Таким образом, общая управляемость процессом нанолитографии с помощью смарт-компонента на 36% выше традиционного способа.

4. Представлена практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы электронной лабораторной средой для учебных занятий по изучению архитектуры отечественных микроконтроллеров и методов их программирования. Реализованный в рамках рассматриваемой ИИУС смарт-компонент состоит из модулей по оценке квалификации специалистов; формированию рекомендаций по обучению; работе с кадровым резервом; - и учитывает всю специфику образовательного процесса: ограничение, назначение и нелинейность. Произведена оценка управляемости разработанной ИИУС.

5. Выполнены экспериментальные исследования и произведена оценка эффективности полученных результатов для различных предметных областей. Результаты экспериментальных исследований и верификация предложенных теоретических основ и принципов построения ИИУС производственными процессами для микро- и наноэлектроники подтверждают увеличение эффективности моделирования и построения ИИУС на 51% по сравнению с существующими решениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы разработаны теоретические положения, направленные на повышение управляемости информационно-измерительных и управляющих систем производственными процессами для микро- и нанoeлектроники за счет высокой точности оценки состояния ИИУС и прогноза ее поведения на основе формального аппарата нелинейной динамики. При этом получены следующие научные и практические результаты:

1. Предложены теоретические подходы к новым принципам построения ИИУС на основе разработанного иерархического построения компонентов системы в качестве объектов управления с заданными граничными условиями, связями между ними и управляющими воздействиями.

2. Впервые предложена обобщенная математическая модель ИИУС, с применением формального аппарата теории хаоса, рассматривающая процесс управления в терминах объектно-ориентированной парадигмы, применение которой обеспечивает определение динамического поведения системы в любой момент времени, то есть позволяет избежать необратимой ситуации.

3. Разработан и исследован новый алгоритм управления устойчивостью ИИУС путем генерирования элементов детерминированного хаоса в случае предполагаемых отклонений от стационарного состояния, определяемых на основе предварительного анализа текущего состояния системы, чем достигается повышение управляемости ИИУС.

4. Впервые разработана и исследована математическая модель определения граничных состояний ИИУС с учетом динамики изменения общего состояния системы при внешнем управляющем воздействии, позволяющая осуществлять оценку управляемости и наблюдаемости как всей системы, так и ее компонентов. Предложенная модель определяет пространство вероятных состояний системы, что практически позволяет избежать катастрофических ситуаций.

5. Предложен и исследован алгоритм прогнозирования состояния ИИУС с точностью более 90%, в основе которого лежит анализ текущих параметров ИИУС с учетом связей между ними с пороговыми значениями из базы данных мониторинга наблюдаемого или референтного процесса.

6. Впервые разработан алгоритм принятия решения в условиях неопределенности внешней среды, внутренних характеристик и целей ИИУС. Наличие такого алгоритма обеспечивает формирование и повышение оперативности корректировки управляющего воздействия более чем в 3 раза. за счет сокращения вероятностного пространства альтернатив, критерия принятия решения и условия достижения цели ИИУС.

7. Разработана и исследована методика построения ИИУС на основе предложенных теоретических подходов, разработанных математических моделей и алгоритмов, которая в отличие от существующих позволяет на 50% повысить эффективность разработки конкретной ИИУС. Методика предусматривает учет таких факторов, как назначение, цели ИИУС, ограничения и нелинейности внешней среды и внутреннего контура системы.

8. Впервые предложено и исследовано новое техническое решение на основе методов нелинейной динамики – наличие в составе ИИУС смарт-компонента, который являясь программной реализацией разработанных в диссертации моделей, алгоритмов и методики, обеспечивает повышение управляемости ИИУС, визуализацию характеристик и компонентов для оценки ее состояния и прогнозирования динамики поведения системы с точностью более 90%.

9. Результаты экспериментальных исследований и верификации предложенных принципов построения ИИУС практически подтвердили адекватность разработанных математических моделей, алгоритмов и методики для их программной реализации в виде смарт-компонента, включаемого в состав конкретной ИИУС любой предметной области.

10. Результаты практической апробации программной реализации в виде смарт-компонента разработанных в ходе диссертации моделей и алгоритмов

подтвердили корректность предложенных теоретических положений повышения управляемости современных ИИУС: в частности, смарт-компонент в составе ИИУС в области нанолитографии обеспечил повышение управляемости на 48% операции совмещения и экспонирования элементов изделия и на 36% - управляемость процессом по сравнению с традиционными методами.

11. Материалы диссертационной работы внедрены в производственный процесс ряда предприятий, в том числе, АО «Микрон», ООО «НМ-Тех», ООО «ИММЕРС», ООО «ЭВМКомплект», ООО «Просенсор Сервис», НИУ МИЭТ, а также в учебный процесс НИУ МИЭТ, НОЧУ ВО МУППИ.

Полученные в настоящей диссертационной работе основные положения, выводы и рекомендации ориентированы на широкое применение предложенных моделей, алгоритмов и методики для повышения управляемости информационно-измерительных и управляющих систем с помощью смарт-компонентов, а также для создания цифровых двойников, разработки интеллектуальных систем прогнозирования, рекомендаций и принятия решений в различных предметных областях. В частности:

- моделирование и определение с высокой точностью параметров различных состояний веществ и материалов (прочность, сверхпроводимость, агрегатные состояния и т.п.);
- моделирование материалов с заданными свойствами;
- прогнозирование поведения объектов и процессов с высокой точностью;
- принятие решения как с участием человека, так и без него;
- управление объектами и процессами с/без участия человека;
- определение психоэмоционального состояния человека и его коррекция;
- диагностика и лечение психических и соматических заболеваний, в том числе вызванных повреждением мозговой структуры;
- формирования индивидуальной траектории основного и дополнительного обучения студентов высших и специальных учебных заведений с учетом

их компетенций и личных достижений;

- формирования траектории карьерного развития для сотрудников предприятий с учетом их компетенций, проектов, личных достижений и должности;

- формирования кадрового резерва специалистов отдельных отраслей с возможностью автоматической интеллектуальной оценки профессиональных качеств и компетенций кандидатов на основе представленной информации;

- интеллектуального подбора сотрудников для реализации проектов с учетом требований и компетенций специалистов;

- и другое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубь Н.Н., Повеквечных С.А. Проблемы и особенности управления материальными потоками в производстве мелкосерийного типа // Насосы. Турбины. Системы. 2023. № 3 (48). С. 36-40.
2. Кочеткова О.В. Проблемы управления активами предприятий в сфере производства // Наука XXI века: актуальные направления развития. 2023. № 2-1. С. 420-423.
3. Калачанов В.Д., Ефимова Н.С., Корчак В.Ю., Ковтун С.А., Ермаков А.А. Глава 8. Разработка процедур и методов для решения проблемы автоматизированного управления производством на высокотехнологичном предприятии // В книге: Автоматизированное управление бизнес-процессами и финансами на высокотехнологичных предприятиях. Учебное пособие. Чебоксары, 2023. С. 206-232.
4. Вишневский А.А. Проблемы внедрения информационных систем для управления производством // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2022. № 6 (275). С. 15-21.
5. Логачева А.В., Михайлов Ю.И. Особенности и проблемы управления качеством в производстве электронно-компонентной базы // Наука настоящего и будущего. 2022. Т. 1. С. 185-187.
6. Коган Ю.Г., Пителинский К.В., Щербина А.А. Взаимодействие систем классов ERP, APS и MES в управлении производством: применение модифицированных раскрашенных сетей Петри для решения проблем в организации обмена данными // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 2 (182). С. 20-24.
7. Матвеева Е.А., Иванов Д.В. Интегрированные системы управления как решение проблемы повышения эффективности производства конструктивно сложной продукции // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 249-256.
8. Дезоер Ч., Видьясагар М. Системы с обратной связью: входо-выходные

- соотношения. Пер. с англ. М.: Наука, 1983.
9. Hassan k. Khali Nonlinear Systems Third Edition - Upper Saddle River, New Jersey 07458. 2022.
 10. Дубаренко В.В., Коновалов А.С., Кучмин А.Ю. Оптимизация динамики систем при управлении в нестационарных условиях. Учебное пособие. - СПб: СПбГУАП, 2008. - 77 с.
 11. Игнатова И.Г., Шевнина Ю.С. Управление обеспечением потребностей учебного процесса в электронных информационных ресурсах // Информационные технологии в образовании, технике и медицине: материалы международной конф. / Изд-во ВолгГТУ. - Волгоград, 2006. – С. 56-57.
 12. Давыдов О.И., Пряничников В.Е. Управление движением мобильного робота по данным ультразвуковых сенсоров // Информационно-измерительные и управляющие системы. -2015. Т. 13. № 7. С. 57 - 67.
 13. Акименко Т.А., Лариошкин И.Н. Структура цифровой системы управления сложными многоконтурными объектами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, № 9, 2021, С. 277-280.
 14. Акименко Т.А., Лариошкин И.Н. Задачи иерархической оптимизации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, № 9, 2020, С. 360-364.
 15. Андреев О.Н., Славутский Л.А., Славутская Е.В. Рекуррентное использование персептрона для структурного анализа сигналов // Вестник Чувашского университета, № 3, 2022, С. 5-11.
 16. Алексеев В.В., Гридина Е.Г., Королев П.Г., Куракина Н.И., Михаль П.Н. Энергосберегающие информационно-измерительные и управляющие системы. Контроль и предупреждение аварийных ситуаций // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», Т.1, 2006, С. 37-39.
 17. Беркутов А.М., Жулев В.И., Прошин Е.М. Анализ задачи общего

- воздействия динамическим магнитным полем на человека // Вестник РГРТА. - Рязань, 1997. - Вып. 3. - С. 73-79.
- 18.Абрамов А.М., Гуржин С.Г., Жулев В.И., Кряков В.Г., Прошин Е.М., Шуляхов А.В. Принципы построения системы контроля и измерения терапевтической, диагностической и экологической информации комплекса «Мультимаг-м» // Биомедицинская радиоэлектроника. 2007. № 7. С. 10-13.
- 19.Муромцев Д.Ю., Титова П.А., Шамкин В.Н. О проблеме управления при минимизации энергопотребления сложного технологического объекта, функционирующего в режиме переменной производительности // В сборнике: Цифровая трансформация в энергетике. Материалы Четвертой Международной научной конференции. 2023. С. 84-87.
- 20.Muromtsev D.Y., Gribkov A.N., Zalukaeva N.Y., Belousov O.A., Belyaev V.P., Trapeznikov E.V. Principles of constructing intellectual information-measuring and control systems based on multiple operation states // В сборнике: AIP Conference Proceedings. «Oil and Gas Engineering, OGE 2020» 2020. С. 050010.
- 21.Вышлов В.А. От всеобщего управления качеством продукции к всеобщему управлению по критериям качества //В сборнике: Философия в XXI веке: социально-философские проблемы современной науки и техники. Материалы I Международной научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С. 160-163.
- 22.Харитонов Е.Ю., Вышлов В.А. Метод калибровки однопортового векторного анализатора цепей и определения параметров калибровочных мер на основе анализа откликов во временной области // Вестник метролога. 2020. № 4. С. 9-16.
- 23.Минаков Е.И., Перлов А.Ю., Панкратов В.А., Мацевич С.В. Алгоритм обучения и валидации имитационной модели РЛС на основе данных диагностического контроля // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 590-593.

24. Федюкин Ю.В., Минаков Е.И., Агуреев И.Е., Хазов Н.И., Чайковский В.М. Построение и применение модели эффективности интеллектуальной транспортной системы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4 (44). С. 77-87.
25. Алексеев В.В., Иванова Н.Е., Иванов А.Ю., Королев П.Г., Соколова Ф.М., Царева А.В. Оценка временных характеристик техники ходьбы с применением мобильной информационно-измерительной системы // Медицинская техника. 2021. № 3 (327). С. 28-31.
26. Центр компетенций по импортозамещению в сфере ИКТ // URL: <https://ru-ikt.ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
27. Системы управления предприятием (ERP) рынок России // URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 12.12.2023).
28. Микроэлектроника (мировой рынок) // URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 12.12.2023).
29. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 года N 20-р
30. Михайлов Д.Ю. Организация системы управления качеством. Пять шагов для эффективного решения любой проблемы на производстве // Мир измерений. 2021. № 3. С. 12-18.
31. Серышев Р.В. Автоматизация процессов управления производством в звеньях цепей поставок: проблемы и решения // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2021. № 2. С. 17-22.
32. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991.
33. Белопольская Я.И. Системы нелинейных обратных и прямых уравнений Колмогорова, обобщенные решения. Теория вероятности и ее применения, 66:1 (2021), 20–54.
34. Арнольд В.И., Теория катастроф, М., «Наука», 1990.
35. Ильяшенко Ю.С. Теоремы конечности для предельных циклов: схема

- обновленного доказательства. Изв. РАН. Сер. матем., 80:1 (2016), 55–118.
36. Капица С.П. Асимптотические методы и их странная интерпретация // *Общественные науки и современность*. 2005. № 2. С. 162—165.
37. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. — М.: Мир, 2002. — 464 с.
38. Kelso, J.A.S. *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. — Cambridge, MA: The MIT Press. 1995.
39. J.G. Foster; D.V. Foster; P. Grassberger; M. Paczuski (2009). "Edge Direction and the Structure of Networks". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 107 (24): 10815–10820.
40. P Grassberger, I Procaccia *Measuring the strangeness of strange attractors. The theory of chaotic attractors*, 170-189.
41. Агарков А.П. Новые подходы к решению современных проблем системного управления в промышленности и машиностроительном производстве // *Экономика и управление в машиностроении*. 2021. № 1. С. 24-27.
42. Черногор С. А. Введение в синергологию и сложные системы моделирования. — М.: Наука, 2008. — 346 с.
43. Мирошник И. В., Никифоров, В. О., Фрадков А. Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами*. — СПб.: Наука, 2000. — 548 с. — (Сер.: Анализ и синтез нелинейных систем). ISBN 5-02-024872-X
44. Тюкин И. Ю., Терехов В. А. *Адаптация в нелинейных динамических системах* — Санкт-Петербург: ЛКИ, 2008. — 384 с. — (Серия: Синергетика: от прошлого к будущему) — ISBN 978-5-382-00487-7
45. Хорошев А. Н. *Введение в управление проектированием механических систем: Учебное пособие*. — Белгород, 1999. — 372 с. — ISBN 5-217-00016-3. Электронная версия 2011 г.

46. Акоф Р. Л., Сасиени М. Основы исследования операций / Пер. с англ. М.: «Мир», 1971. — 536 с.
47. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. М.: «Наука», 1985.
48. Арнольд В. И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1978.
49. Шевнина, Ю.С. Формирование интерфейсов пользователей для доступа к объединенным корпоративным информационным ресурсам (диссертация кандидата технических наук). – дис. канд. тех. наук: 05.13.01. - М., 2007. - 174 с.
50. Шевнина, Ю.С. Формирование интерфейсов пользователей для доступа к объединенным корпоративным информационным ресурсам (автореферат диссертации кандидата технических наук). - Автореферат дис. канд. тех. наук: 05.13.01. - М., 2007. - 21 с.
51. Калман, Р., Фалб, П., Арбиб, М. Очерки по математической теории систем. Пер. с англ. Наппельбаума, Э. Л. Под ред. Цыпкина, Я. З. М.: «Мир», 1971.
52. Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б., Подлазов А. В. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды. — М.: УРСС, 2006.
53. Sefa Aras, Eyüp Gedikli, Hamdi Tolga Kahraman. A novel stochastic fractal search algorithm with fitness-Distance balance for global numerical optimization. Swarm and Evolutionary Computation, Volume 61, 2021, 100821, ISSN 2210-6502, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100821>.
54. Шевнина Ю.С., Павлов А.Ю. Информационная система публикации описаний статей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника» // Микроэлектроника и информатика – 2006: тезисы докладов 13-й Всероссийской межвузовской научно-технич. конф. студентов и аспирантов / Изд-во МИЭТ. – Москва, 2006. – С. 225.
55. Афраймович В. С., Быков В. В., Шильников Л. П. О притягивающих негрубых предельных множествах типа аттрактора Лоренца // Труды

- Мос. мат. об-ва, 1982. т. 44. с. 150-212.
56. Безручко Б. П., Гуляев Ю. В., Кузнецов С. П., Селезнев Е. П. Новый тип критического поведения связанных систем при переходе к хаосу // ДАН СССР. 1985. т. 87, № 3. с. 619-622.
57. Григорьева Е. В., Кащенко С. А., Лойко Н. А., Самсон А. М. Мультистабильность и хаос в лазере с отрицательной обратной связью // Квантовая электроника, 1990, т. 17, №8, с. 1023–1028.
58. Игнатова И.Г., Бобкова А.В., Павлов А.Ю., Соколова Н.Ю., Шевнина Ю.С., Чаплыгин А.Ю. Формирование и объединение метаописаний разнородных гетерогенных информационных ресурсов для поддержки образовательной деятельности вуза // Новые образовательные технологии в вузе: сб. тезисов докладов / Изд-во УПИ. – Екатеринбург, 2005. –С. 240-241.
59. Шевнина Ю.С., Павлов А.Ю. Объединение гетерогенных информационных ресурсов на основе репозитория метаописаний // Международная школа-конференция по приоритетному направлению «Информационно - телекоммуникационные системы» с участием молодых ученых, аспирантов и студентов стран - членов СНГ: сб. тезисов докладов / Изд-во МИЭТ. – Москва, 2005. – С. 33.
60. Безручко Б. П., Кузнецов С. П., Трубецков Д. И. Экспериментальное наблюдение стохастических автоколебаний в динамической системе «электронный пучок–обратная электромагнитная волна» // Письма в ЖЭТФ. 1979. т. 29, № 3. С. 180–184.
61. Collet P., Eckmann J. P., Landford O. E. Universal properties of maps on an interval // Commun. Math. Phys. 1980. vol. 76, no. 3, pp. 211–254.
62. Franceschini V. Feigenbaum sequence of bifurcation in the Lorenz model // J. Stat. Phys. 1980. vol. 22. pp. 397-406.
63. Huberman D.A., Rudnic I. Scaling behaviour of chaotic flows // Phys. Rev. Lett. 1980. vol. 45. no. 3. pp. 154-157.
64. Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Шохнин В.В.

- Экспериментальное исследование генерации хаотических колебаний в ансамбле двухкаскадно-связанных фазовых систем // Письма в ЖТФ, 2005, т. 31, вып. 24, с. 31-38.
65. Матросов В. В., Шалфеев В.Д., Касаткин Д.В. Анализ областей генерации хаотических колебаний взаимосвязанных фазовых систем // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2006, т. XLIX, №5, с. 448-457.
66. Захаров Д.Г., Некоркин В.И. Синхронизация в модели взаимодействующих нейронов нижних олив с переменной электрической связью // Биофизика. 2009, т. 54, № 1, с. 4652.
67. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Чирков А.В., Миронов Н.С. Разработка средств автоматизации управления биржевыми курсами на основе методов нелинейной динамики // Моделирование систем и процессов. Том 14 (выпуск 4), 2021. С. 73-79.
68. Бакунов Г.М., Матросов В.В., Шалфеев В.Д. О квазисинхронных режимах в системе фазовой автоподстройки частоты с фильтром второго порядка при приближенном учете запаздывания // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. т. 19. №3, с. 171-178.
69. Матросов В.В., Шмелев А.В. Нелинейная динамика кольца из трех фазовых систем // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. т. 19. №1, с. 123-136.
70. Гагарина Л.Г., Портнов Е.М., Шевнина Ю.С. Обзор современных методов, моделей и средств представления нелинейных систем и процессов различной природы и сложности // Сборник статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции «Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки» (Омск, 22.06.2021 г.). – Уфа: OMEGA SCIENCE, 2021. – с. 18-21
71. Matrosov V.V., Kazantsev V.B. Bifurcation mechanisms of regular and chaotic network signaling in brain astrocytes // CHAOS. 2011, vol. 21, p. 023103.

72. Courbage M., Nekorkin V.I. Map based models in neurodynamics // *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2010. vol. 20, no. 6, pp. 1631-1651.
73. Klinshov V.V., Nekorkin V.I. Synchronization of time-delay coupled pulse oscillators // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2011, vol. 44, no. 1-3. pp. 98-107.
74. Кащенко С. А., Григорьева Е. В. Локальная динамика лазера с быстро осциллирующими параметрами // *Моделирование и анализ информ. систем*, 2013, т. 20, №5, с. 45–61.
75. Матросов В.В., Шалфеев В.Д. Нелинейная динамика систем фазовой синхронизации. – Н.Новгород. 2013.
76. Кириллов С.Ю., Некоркин В.И. Динамическая седло-узловая бифуркация предельных циклов в модели нейронной возбудимости // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, 2014, т. 57, №11, с. 934-946.
77. Oppenheim A.V., Wornell G.W., Isabelle S.H., and Cuomo K.M. Signal Processing in the Context of Chaotic Signals // *Proc. IEEE ICASSP, San Francisco*, 1992. vol. IV, pp. 117– 120.
78. Краснов М.В., Шевнина Ю.С. Подход к идентификации релизов в страховой компании // сборник статей Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и применения современных технологий» (Петрозаводск, 2021). – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2021 – с. 44-48.
79. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. Передача информации с использованием детерминированного хаоса // *Радиотехника и электроника*. 1993. т. 38. no. 7. с. 1310–1315.
80. Калинина Е.А., Камачкин А.М., Степенно Н.А., Тамасян Г.Ш. К вопросу о конструктивном критерии управляемости. Ч. I. Циклические инвариантные подпространства // *Вестник СПбГУ. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2023. №2.
81. Павлов А.Ю. Об управляемости нелинейной системы // *Вестник МГУ*. 1995. №1.

82. Крахотко В.В., Размыслович Г.П., Игнатенко В.В. Н-управляемость динамических систем // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2020. №2 (236).
83. Enrico Gallinucci, Matteo Golfarelli, Stefano Rizzi, Alberto Abelló, Oscar Romero. Interactive multidimensional modeling of linked data for exploratory OLAP, *Information Systems*, Volume 77, 2018, Pages 86-104.
84. A. Cheraghalipour, M. Hajiaghaei-Keshteli, M. M. Paydar, Tree growth algorithm (tga): A novel approach for solving optimization problems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 72 (2018) 393–414.
85. K.S. Duisebekova, D.K. Kozhamzharova, S.B. Rakhmetulayeva, F.A. Umarov, M. Zh. Aitimov. Development of an information-analytical system for the analysis and monitoring of climatic and ecological changes in the environment: Part 1, *Procedia Computer Science*, Volume 170, 2020, Pages 578-583, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.128>.
86. Шевнина Ю.С., Шаройко Н.Н. Особенности моделирования процесса развития города // В сборнике статей I Всероссийской школы-семинара НЦФМ для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Центр исследования архитектур суперкомпьютеров». Саров. 2023. С. 71-73.
87. Шевнина Ю.С., Якубов Р.Р. Особенности кластерного анализа данных при моделировании развития городов // В сборнике статей I Всероссийской школы-семинара НЦФМ для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Центр исследования архитектур суперкомпьютеров». Саров. 2023. С. 73-75.
88. Adrian Stadnicki, Filip Filip Piętroń, Patryk Burek. Towards a Modern Ontology Development Environment. *Procedia Computer Science*, Volume 176, 2020, Pages 753-762, ISSN 1877-0509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.070>.
89. Казаковцев Л. А. Метод жадных эвристик для систем автоматической группировки объектов: диссертация доктора технических наук: 05.13.01.

- Сибирский федеральный университет.- Красноярск, 2016.
- 90.Kwon Y., Omitaomu O.A., Wang G.-N. Data mining approaches for modeling complex electronic circuitdesign activities. //Computer & Industrial Engineering, 2008. Vol. 54. P. 229-241.
- 91.MIL-PRF-38535 Performance Specification: Integrated Circuits (Micricircuit) Manufacturing, General Specifications for. United States of America: Department of Defence, 2007. 188 p.
- 92.Беляева Т.П. Достаточность и реализуемость требований к электронной компонентной базе // Моделирование систем и процессов, 2010. № 3-4. С. 10-12.
- 93.Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // J. Atm. Sci. 1963. vol. 20. p. 130.
- 94.Шарковский А. Н. Сосуществование циклов непрерывного преобразования прямой в себя // Укр. мат. журн. 1964. № 1. С. 61–71.
- 95.Hossein Movafegh Ghadirli, Ali Nodehi, Rasul Enayatifar, An overview of encryption algorithms in color images. Signal Processing, Volume 164, 2019, Pages 163-185, ISSN 0165-1684, <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.06.010>.
- 96.Федосов В.В., Патраев В.Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах. // Авиакосмическое приборостроение, 2006. № 10. С.50-55.
- 97.Орлов В.И., Федосов В.В. Фирменный стиль: надежность и качество // Петербургский журнал электроники. № 1(62), 2010. С. 55-62.
- 98.Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. – М.: Наука. 1992.
- 99.Tony Liao, Kun Xu A process approach to understanding multiple open source innovation contests – Assessing the contest structures, execution, and participant responses in the android developer challenges // Information and

Organization. 2020. №30, issue 2, 100300

100. Шевнина Ю.С. Развитие псевдонауки в современном цифровом обществе // В сборнике I Международной научно-практической конференции «Философия в XXI веке: социально-философские проблемы современной науки и техники» – 2023. – С. 254-257.
101. O.L. Golitsyna, N.V. Maksimov, K.V. Monankov, Focused on Cognitive Tasks Interactive Search Interface, Procedia Computer Science, Volume 145, 2018, Pages 319-325, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.11.078>.
102. Ruelle D, Takens F. On the nature of turbulence // Commun. Math. Phys. 1971. vol. 2, no. 20. pp. 167–192.
103. Афраймович В. С., Быков В. В., Шильников Л. П. О возникновении и структуре аттрактора Лоренца // ДАН СССР. 1977. т. 234, № 2. С. 336–339.
104. Кащенко С.А., Майоров В.В., Мячин М.Л. Многообходные аттракторы в системе двух и трех диффузионно-связанных нейронов, описываемых уравнениями с запаздыванием // Моделирование и анализ информ. систем. 2008, т. 15, №2, с. 72–74.
105. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Миронов Н.С., Комаров П.С., Чирков А.В. Программа для оценки состояния прибрежной зоны в любом месте мирового океана на основе нейросетевых алгоритмов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022684307, 13.12.2022.
106. Tsirlin, A., Gagarina, L. Finite-time thermodynamics in economics // Entropy, 2020, 22(8), 891 <https://doi.org/10.3390/e22080891>.
107. Максимова И. С. Управляемость нелинейных систем со сменой фазового пространства // ТВИМ. 2021. №2 (51).
108. Исмоилов И.И., Грачева Е.И. Повышение управляемости энергетическими системами и улучшение качества электроэнергии // Вестник КГЭУ. 2022. №1 (53).

109. A. Cheraghalipour, M. Hajiaghaei-Keshteli, M. M. Paydar, Tree growth algorithm (tga): A novel approach for solving optimization problems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 72 (2018) 393–414.
110. Левич А. П. Энтропийная параметризация времени в общей теории систем. В кн.: Системный подход в современной науке. — М.: «Прогресс-Традиция», 2004. — 560 с.
111. Tung The Tran, Khoa Hoang Truong, Dieu Ngoc Vo. Stochastic fractal search algorithm for reconfiguration of distribution networks with distributed generations. *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 11, Issue 2, 2020, Pages 389-407, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.015>.
112. Boosting decision stumps for dynamic feature selection on data streams. *Information Systems*, Volume 83, 2019. Pages 13-29, ISSN 0306-4379, <https://doi.org/10.1016/j.is.2019.02.003>.
113. Gram-Hanssen Kirsten. Home is where the smart is? // Evaluating smart home research and approaches against the concept of home. - *Energy Research & Social Science*. - №37. – 2018. - pp. 94-101
114. Kang B., Kim D., Choo H. Internet of Everything: A Large-Scale Autonomic IoT Gateway. - *IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems*, 3 (3) (2017), pp. 206-214
115. Serbin V., Moldagulova A., Duisebekova K., Satybaldieva R., Rakhmetulayeva S.B., Orazbekov S., Tursunkulova A., Alimzhanova L., Zhuanyzhev I. Mathematical Model for the Research of Systems with Massively Parallel Processing Based on Big Data. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Year: 2018, Volume 13 Issue 1 Page No.: 137-149.
116. Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools, *Computers in Industry*, Volume 123, 2020, 103300, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103300>.
117. Бахтина А.И., Шевнина Ю.С. Философские подходы к вопросу автоматизации формирования кадрового резерва для дизайн-центров //

- Сборник статей. II Международная научно-практическая конференция «Философия в XXI веке: направления и тенденции развития»: НИУ «МИЭТ», 2024. С. 15-19.
118. K. Efthymiou, D. Mourtzis, A. Pagoropoulos, N. Papakostas, G. Chrysolouris Manufacturing systems complexity analysis methods review // International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 29 (2016), pp. 1025-1044
119. Игнатова И.Г., Соколова Н.Ю., Павлов А.Ю., Шевнина Ю.С. Способ интеграции описаний информационных ресурсов в коллекциях с распределенным хранением гетерогенных первичных ресурсов // Современные информационные технологии: тр. межд. научно-техн. конф. / Изд-во Пензенская гос. технологическая академия. – Пенза, 2006. – Вып. 3 / под ред. В.Б. Моисеева, Л.Г. Когельмана, С.В. Трубицкова. – С. 72-76.
120. Странные аттракторы / Сборник статей под ред. Я. Г. Синая, Л. П. Шильникова. – М.: Мир, 1981.
121. Kazantsev V.B., Nekorkin V.I., Velarde M.G. Pulses, fronts and chaotic wave trains in a onedimensional Chua's lattice // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1997, vol. 7, no. 8, pp. 1775-1790.
122. Кащенко С. А., Майоров В. В., Мышкин И. Ю. Волновые образования в кольцевых нейронных системах // Мат. моделирование. 1997, т. 9, №3, с. 29–39.
123. Шевнина Ю.С., Найдис Д.О. Использование I2P IRC сетей для анонимизации в сети интернет // В сборнике: Высокотехнологичное право: точка бифуркации, 2024. – С. 34-37.
124. Кащенко С. А. О бифуркациях при малых возмущениях в логистическом уравнении с запаздыванием // Моделирование и анализ информ. систем, 2017, т. 24, №2, с. 168– 185.
125. MATLAB // URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения: 12.12.2023).

126. Урманов М.Н., Нуритдинов Н.Д., Алиева А.А. Решение систем нелинейных уравнений в MATLAB. *Science and innovation*, vol. 1, no. A3, 2022, С. 139-145.
127. MathCad // URL: <https://etu.ru/ru/obrazovatel'naya-deyatelnost/centr-kompetenci-y-ptc/mathcad> (дата обращения: 12.12.2023).
128. Капалин В.И. MathCad и теория управления. *The Scientific Heritage*, no. 23-1 (23), 2018, С. 45-51.
129. SimInTech // URL: <https://simintech.ru/5> (дата обращения: 12.12.2023).
130. Власов Д.В., Мясников А.В., Аксенов Д.А., Сидоров В.Г. Использование simintech при автоматизации технологических процессов // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, №. 2, 2021, С. 17-19.
131. Михайленко Л.А., Русин Д.С., Устименко В.В., Чубарь А.В. Параметрический синтез регулятора метаэвристическим алгоритмом в среде SimInTech" *Космические аппараты и технологии*, № 3 (33), 2020, С. 171-177.
132. AnyLogic // URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
133. Федотов В.А. Моделирование системы в Anylogic // *Форум молодых ученых*, №. 2 (54), 2021, С. 247-253.
134. Шевнина Ю.С. Иерархическая модель нелинейной динамической системы // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*, №8, 2021. – С. 135-139.
135. Шевнина Ю.С. Метод декомпозиции сложной нелинейной системы на основе процессного подхода // *Системы управления и информационные технологии*, №3(85), 2021. – С. 24-29.
136. Shevnina Ju.S., Gagarina L.G., Fedorov A.R. Features of the decomposition of nonlinear processes and systems within the framework of the system approach // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 1130. 2024. –

- C. 137-147.
137. Shevnina Yu.S., Tsarapkin S.F., Si Thu Thant Sin Processing of nonlinear heterogeneous data in information and control systems // Proceedings of the 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), IEEE, pp. 3071-3077.
138. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Подходы к оценке управляемости сложной информационной системы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. № 3, 2024, С. 33-38.
139. Самарский, А.А., Михайлов А.П. Математические модели. Идеи. Методы. Примеры. – Изд. 2-е, испр. - М. : Физматлит, 2002.
140. Репин В.В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. — М.:РИА «Стандарты и качество», 2004
141. Игнатова И.Г., Соколова Н.Ю., Шевнина Ю.С. Адаптация представлений интегрированных электронных учебных ресурсов на специфику предметной области // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: материалы Всероссийской научно-техн. конф./ Изд-во ВСГТУ. – Улан-Удэ, 2006. – С. 380-383.
142. Садовский В. Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития. — М.: Наука, 1980.
143. Shevnina Yu.S., Gagarina L.G., Konyuhov E.V. Modeling of a Digital Twin of an Automated Production Process // Proceedings of the 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), IEEE, pp. 3046-3050.
144. Матричная модель предприятия // quality.eup.ru URL: <https://quality.eup.ru/MATERIALY6/matrixmodel.html> (дата обращения: 17.04.2021).
145. Цурков В.И. Декомпозиция в задачах большой размерности. Под ред. Г.С. Поспелова. 1981. 352 с.
146. Joerg Schoenfisch, Christian Meilicke, Janno von Stülpnagel, Jens

- Ortmann, Heiner Stuckenschmidt. Root cause analysis in IT infrastructures using ontologies and abduction in Markov Logic Networks. *Information Systems*, Volume 74, Part 2, 2018, Pages 103-116, ISSN 0306-4379, <https://doi.org/10.1016/j.is.2017.11.003>.
147. Шевнина, Ю.С. Декомпозиция нелинейной системы при моделировании ее поведения // *Микроэлектроника и информатика – 2021 : тезисы докладов 28-й Всероссийской межвузовской научно-технич. конф. студентов и аспирантов / Изд-во МИЭТ. – Москва, 2021. – С. 225.*
148. Enrico Gallinucci, Matteo Golfarelli, Stefano Rizzi, Alberto Abelló, Oscar Romero. Interactive multidimensional modeling of linked data for exploratory OLAP, *Information Systems*, Volume 77, 2018, Pages 86-104, ISSN 0306-4379, <https://doi.org/10.1016/j.is.2018.06.004>.
149. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. К вопросу о моделировании нелинейных систем различной сложности // *Системы компьютерной математики и их приложения: межвузовский сборник научных трудов. Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2023. Вып. 24. – С. 205-210.*
150. Akemi Gálvez, Andrés Iglesias, José A. Díaz, Iztok Fister, Joaquín López, Iztok Fister Jr., Modified OFS-RDS bat algorithm for IFS encoding of bitmap fractal binary images, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 47, 2021, 101222, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101222>.
151. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Чирков А.В., Миронов Н.С. Особенности организации доступа в автоматизированных информационных системах на основе принципов нелинейной динамики // *Вестник воронежского технического государственного университета, Том 17 (№4), 2021 – С. 50-57.*
152. Lan Yang, Kathryn Cormican, Ming Yu. Ontology-based systems engineering: A state-of-the-art review. *Computers in Industry*, Volume 111, 2019, Pages 148-171, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.05.003>.

153. Ted Habermann, Metadata and Reuse: Antidotes to Information Entropy. *Patterns*, Volume 1, Issue 1, 2020, 100004, ISSN 2666-3899, <https://doi.org/10.1016/j.patter.2020.100004>.
154. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С., Лукьянова Е.Н., Лукьянова Ю.А. Информационные системы и технологии - М.: МИЭТ, 2023. - 171 с. ISBN 978-5-7256-0999-8.
155. Eirik Berge, Stine Marie Berge, Franz Luef. The affine Wigner distribution, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Volume 56, 2022, Pages 150-175, ISSN 1063-5203, <https://doi.org/10.1016/j.acha.2021.08.006>.
156. G. Ramesh, A.Menen Automated dynamic approach for detecting ransomware using finite-state machine // *Decision Support Systems*. 2020. №138, 113400.
157. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С. Моделирование цифрового двойника производственного процесса с использованием смарт структуры // *Системы компьютерной математики и их приложения*. – 2022. – № 23. – С. 84-90.
158. V. Kolar, M. Schöber, J. Diwold Differential–geometric decomposition of flat nonlinear discrete-time systems // *Automatica*. 2021. vol.132.
159. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Особенности использования статистических моделей при разработке информационно-измерительных и управляющих систем // *Системы компьютерной математики и их приложения: межвузовский сборник научных трудов*. Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2024. Вып. 25. – С. 215-220.
160. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С., Игнатова И.Г. Информационная система подготовки STEAM-модулей для непрерывного образовательного процесса // *Современные исследования и инновации в науке и технике: сборник статей IV Международной научно-практической конференции*. – Москва: Научный клуб «Ракета». – 2022. – с. 16-21.

161. P. Grachev, I. Lobanov, I. Smetannikov, A. Filchenkov Neural network for synthesizing deterministic finite automata // *Procedia Computer Science*, 119 (2017), pp. 73-82.
162. Shevnina, Ju.S., Gagarina, L.G., Chirkow, A.V. On the Issue of Modeling Complex Nonlinear Systems // *AIP Conference Proceedings* 2467, 2021. С. 565.
163. E. Gusthavo, G. E. de Freitas Rocha Loures, E.A. Portela Santos, R. E. Kondo, G. R. Del Negro Martins Towards a smart workflow in CMMS/EAM systems: An approach based on ML and MCDM // *Journal of Industrial Information Integration*. 2021.
164. R.M. Babakov, A.A. Barkalov Algebraic interpretation of a microprogram finite-state machine with datapath of transitions // *Cybernetics and Systems Analysis*, 52 (2) (2016), pp. 191-198.
165. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем – М, Инфра-М, 2024 – 359 с.
166. Патраев В.Е. Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования: монография. Красноярск: Издательство СибГАУ, 2010. 136 с.
167. Казаковцев Л.А., Орлов В.И., Ступина А.А., Масич И.С. Задача классификации электронной компонентной базы. // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*, 2014. № 4 (56). С. 55-61.
168. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С. Основы проектирования и разработки информационных систем – М, Инфра-М, 2024 – 211 с.
169. Харченко В.С., Юрченко Ю.Б. Анализ структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании компонент Industry // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2003. № 2. С.3-10.
170. Шевнина Ю.С. Программа для оценки управляемости и

- наблюдаемости автоматизированного технологического процесса производства изделий и компонентов. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022619223, 19.05.2022
171. М. Каменнова, А. Громов, М. Ферапонтов, А. Шматалюк. Моделирование бизнеса. Методология ARIS -М.: Весть-МетаТехнология, 2000.
172. Богданов А. А. Тектология: Всеобщая организационная наука. Редколлегия В. В. Попков (отв. ред.) и др. Сост., предисловие и комментарии Г. Д. Гловели. Послесловие В. В. Попкова. — М.: «Финансы», 2003, С. 287.
173. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Чиндина Е.А., Конюхов Е.В. Принципы управления технологическими процессами в рамках автоматизации производств // Датчики и системы, № 2, 2024, С. 21-28.
174. Уёмов А. И. Л. фон Бергаланфи Общая теория систем. В кн.: Системный подход в современной науке. — М.: «Прогресс-Традиция», 2004. — 560 с., С. 37—52.
175. Fengyi Yuan, Yuzhen Ma, Yan-Jun Liu, Jie Lan, Tongyu Xu, Adaptive distributed tracking control for non-affine multi-agent systems with state constraints and dead-zone input, Journal of the Franklin Institute, Volume 359, Issue 1, 2022, Pages 352-370, ISSN 0016-0032, <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2021.09.027>.
176. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Си Ту Тант Син Особенности адаптивной обработки данных в информационно-управляющих системах // Российский форум «Микроэлектроника 2023» 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов Парк науки и искусства «Сириус», 9–14 октября 2023 г. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – С. 181-183.
177. Игнатова И.Г., Шевнина, Ю.С., Павлов А.Ю. Использование профилированных интерфейсов в системе дистанционного образования при организации взаимодействия преподавателей и студентов //

- Дистанционное образование: области применения, проблемы и перспективы развития: тр. международной научно-практич. Интернет-конф. / МГОУ. – Москва, 2005. – С. 96-99.
178. N. Zhanga, C. Zhang, D. Wu Construction of a smart management system for physical health based on IoT and cloud computing with big data // Computer Communications. 2021. №171. pp. 183-194.
179. Казаковцев Л.А., Масич И.С., Орлов В.И., Федосов В.В. Быстрый детерминированный алгоритм для классификации электронной компонентной базы по критерию равнонадежности. // Системы управления и информационные технологии, 2015. Т. 62. № 4. С. 39-44.
180. Шевнина Ю.С., Рябов П.Е., Прокопчина С.В., Кочкаров Р.А. Подходы к прогнозированию изменения состояния обеспечивающих компонентов информационно-управляющей системы // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. № 12(3), 2024, С. 15-22.
181. Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Стриханов М.Н. [и др.]. Развитие базовой технологии прогнозирования, оценки и контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2012. № 5 (97). С. 18-23.
182. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Слюсарь В.В., Баин А.М. Программа для визуализации состояния нелинейной системы в режиме реального времени. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021617601, 30.04.2021.
183. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С. Анализ данных в интеллектуальной среде прогнозирования правонарушений // В сборнике: Высокотехнологичное право: генезис и перспективы, 2022. – С. 54-57.
184. Прогнозирование надежности узлов и блоков радиотехнических устройств космического на основе моделирования напряженно-деформируемых состояний. / С. Б. Сунцов

- [и др.]. Томск: Издательство назначения Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2012. 114 с.
185. Шевнина Ю.С., Томишинец А.М. Автоматизация семантического анализа информации на естественном языке в результатах поисковой выборке // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, Т. 10 №4(56), 2021, С. 35-39.
186. Масич И.С. Модель логического анализа для прогнозирования осложнений инфаркта миокарда. // Информатика и системы управления, 2010, №3 (25). С. 48-56.
187. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Программное обеспечение для прогнозирования изменения состояния автоматизированного технологического процесса. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022619755, 26.05.2022.
188. Кузьмич Р.И., Масич И.С. Модификации метода логического анализа данных для задач классификации: монография. Красноярск: Сиб. федер. унт, 2018. 180 с.
189. Шевнина Ю.С. Программный модуль для принятия решения в условиях неопределенности при управлении АСУ ТП. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022618378, 06.05.2022
190. May R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics // Nature. 1976. vol. 261, no. 6, pp. 459–467.
191. Шевнина Ю.С. Программа для оценки состояния АСУ ТП и формирования управляющего воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022618445, 06.05.2022.
192. Mayer-Kress G., Haken H. Intermittent behavior of logistic system // Phys. Rev. Lett. A. 1981. vol. 82, no. 4. pp. 151–155.
193. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Конюхов Е.В., Харитонов А.Д.

- Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2023. – Т. 28. – № 4. – С. 537-546.
194. Шевнина Ю.С., Федюнина Е.А., Кузнецова Е.С., Щагин А.В. Оценка инвестиционной эффективности разработки сложной бортовой аппаратуры методами математического моделирования // Электронные информационные системы. №1 (4), 2024, Стр. 98-110.
195. Nekorkin V.I., Kazantsev V.B., Rabinovich M.I., Velarde M.G. Controlled disordered patterns and information transfer between coupled neural lattices with oscillatory states // Phys. Rev. E. 1998, vol. 57, no. 3, pp. 3344-3351.
196. Шевнина, Ю.С., Игнатова И.Г. Способ организации упрощенного доступа к накопленным гетерогенным информационным ресурсам // Наука и образование, №5, 2007. С. 21-27.
197. Марка Д., МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования. — М.: МетаТехнология, 1993.
198. Риб С.И., Кремлева И. В. Различные подходы к выделению и описанию бизнес-процессов М.: МетаТехнология, 2018.
199. Шевнина Ю.С., Буравов А.Н., Константинов В.В., Томишинец А.М. Лабораторный практикум по курсу «Web-программирование» - М, МИЭТ, 2021 – 64 с.
200. Шевнина, Ю.С. Метод формирования поисковых интерфейсов на основе параметров, отражающих специфику предметных направлений // Наука и образование, №8, 2007. С. 27-35.
201. Jicao Dao, S. Thomas Ng, Yifan Yang, Shenghua Zhou, Frank J. Xu, Martin Skitmore. Semantic framework for interdependent infrastructure resilience decision support. Automation in Construction, Volume 130, 2021, 103852, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103852>.
202. Шевнина Ю.С. Моделирование состояния технологического оборудования в составе информационно-управляющей системы //

- Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. № 1, 2024, С. 29-35.
203. Shevnina, Yu.S., Sokolova, N.Yu., Kyaw Zaw Ye. Organization of Remote Interaction Between Lecturer and Student During Completion of Study Assignment// Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2021, стр. 2076-2080.
204. Шевнина, Ю.С., Игнатова И.Г. Метод формирования целевых Web-интерфейсов для работы с информационными ресурсами // Известия высших учебных заведений. Электроника, № 4, 2007. С. 65-70.
205. Naina Emmanuel, Abid Khan, Masoom Alam, Tanveer Khan, Muhammad Khurram Khan, Structures and data preserving homomorphic signatures. Journal of Network and Computer Applications, Volume 102, 2018, Pages 58-70, ISSN 1084-8045, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.11.005>.
206. Шевнина Ю.С. Автоматизации удаленного взаимодействия участников образовательного процессы // Автоматизация. Современные технологии. Т.77. № 1. 2023, С. 43-48.
207. Улитина П.А., Шевнина Ю.С. Автоматизация бизнес-процессов кадровой службы предприятия // В сборнике статей Международной научно-практической конференции «Кооперация науки и общества - путь к модернизации и инновационному развитию». Иркутск. 2023. С. 81-84.
208. Cai H., Xu B., Jiang L., Vasilakos A.V. IoT-Based Big Data Storage Systems in Cloud Computing: Perspectives and Challenge. - IEEE Internet of Things Journal, 4 (1) (2017), pp. 75-87
209. Игнатова И.Г., Соколова Н.Ю., Шевнина Ю.С. Технология взаимодействия преподаватель-обучаемый в сетевой образовательной среде // Современное образование: содержание, технологии, качество: материалы XII международной конф. / Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –

- СПб., 2006. – Том 2. – С. 94-95.
210. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Климочкина М.А., Попова Т.В. Программа для освоения учебной дисциплины «История» с интерактивными элементами. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023665090. 12.07.2023.
211. Игнатова И.Г., Шевнина Ю.С., Павлов А.Ю. Разработка в информационной системе интерфейса пользователя, адаптированного к онтологической модели предметной области // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития: сб. науч. тр. / Черноморье. – Одесса, 2005. – Том 7: Технические науки. – С. 77–80.
212. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Конюхов Е.В., Хвостик П.М. Разграничение доступа в автоматизированных системах управления // Научно-технический вестник-Поволжья. – 2023. – №12 – С. 460-463.
213. Данилин Н.С. Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. М.: Из-во стандартов, 1991. 176 с.
214. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Климочкина М.А., Попова Т.В. Программное обеспечение для создания интерактивных учебно-методических материалов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023665037, 11.07.2023.
215. Шевнина Ю.С. Особенности автоматизированного мониторинга производственной среды с использованием смарт-структур // Национальная безопасность и стратегическое планирование, № 1 (37), 2022 – С.123-130.
216. Kuzmich R. et al. The Modified Method of Logical Analysis Used for Solving Classification Problems. // INFORMATICA, 2018, Vol. 29, № 3. P. 467–486.
217. Игнатова И.Г., Шевнина, Ю.С., Павлов А.Ю. Формирование профилированных интерфейсов при организации работы с информационными ресурсами для пользователей из научно-

- образовательного сообщества // Дистанционное образование: области применения, проблемы и перспективы развития : тр. международной научно-практич. Интернет-конф. / МГОУ. – Москва, 2005. – С. 93-96.
218. Feigenbaum M. J. The universal metric properties of nonlinear transformations // J. Stat. Phys. 1979. vol. 21. №. 6. pp. 669–706.
219. Шевнина Ю.С., Смирнов М.С. Сравнительный анализ программных продуктов для автоматизации процесса мониторинга производственной среды предприятия // В сборнике: Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем. – 2023. – С. 141-145.
220. Courbage M., Kazantsev V.B., Nekorkin V.I., Senneret M. Emergence of chaotic attractor and anti-synchronization for two coupled monostable neurons // Chaos, 2004 vol. 12, pp. 1148-1156.
221. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Конюхов Е.В. Управление параметрами исполнительного оборудования при автоматизации производства // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2024. – Т. 29. – № 3. – С. 427-431.
222. Кащенко И.С., Кащенко С.А. Динамика сильно связанных пространственно-распределенных логистических уравнений с запаздыванием // Журн. выч. мат. и мат. физ., 2015, т. 55, №4, с. 610–620.
223. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Обработка исключительных ситуаций в автоматизированных производственных процессах // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки» (Казань, 17.05.2022 г.). – Уфа: OMEGA SCIENCE, 2022. – с. 55-58.
224. Шевнина Ю.С. Моделирование пользовательских интерфейсов в системах формирования и использования распределенных гетерогенных информационных ресурсов // Актуальные инновационные исследования: наука и практика, №1, 2010. С. 5-15.

225. Шевнина Ю.С., Игнатова И.Г., Соколова Н.Ю., Жданова И.В. Инструментальные средства создания и сопровождения электронных коллекций информационных ресурсов // Наука и образование, №5, 2009. С. 2-9.
226. Средства поддержки формирования и объединения метаописаний разнородных гетерогенных информационных ресурсов: Отчет о НИР (этап 2005-2006)/ МОЦНИТ МИЭТ; рук. Чаплыгин Ю.А. - Шифр 737-ГБ-Целевые-РФФИ-МОЦНИТ.
227. Уёмов А. И. Логический анализ системного подхода к объектам и его место среди других методов исследования. В кн.: Системные исследования. Ежегодник. — М.: «Наука», 1969. — 203 с., С. 80—96.
228. Шевнина Ю.С. Метод адаптации интерфейсов пользователей на терминологию предметной области в системах формирования и использования распределенных гетерогенных информационных ресурсов // Наука и образование. №1, 2010. С. 15-21.
229. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С. Интеллектуальная среда поддержки образовательного процесса на основе смарт-структур // Наука и техника: новые вызовы современности: сборник статей VI Международной научно-практической конференции. – Москва: Научный клуб «Ракета». – 2022. – С. 18-23.
230. Thierry Bouwmans, Caroline Silva, Cristina Marghes, Mohammed Sami Zitouni, Harish Bhaskar, Carl Frelicot. On the role and the importance of features for background modeling and foreground detection, Computer Science Review, Volume 28, 2018. Pages 26-91, ISSN 1574-0137, <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.01.004>.
231. Шевнина Ю.С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных // Известия вузов. Электроника, Т. 27 №3. 2022, С. 407-415.
232. B. Kolar, A.Kaldmäe, M. Schöberl, Ü. Kotta, K. Schlacher Construction of Flat Outputs of Nonlinear Discrete-Time Systems in a

- Geometric and an Algebraic Framework // IFAC-PapersOnLine. 2016. vol.49, issue 18. pp. 796-801.
233. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Программа интеллектуального подбора кадров. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023665088, 12.07.2023.
234. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Подходы к автоматизации процессов центров коллективного проектирования микроэлектроники // Информационные технологии и вычислительные системы, №4, 2021. – С. 3-16.
235. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Программный комплекс для создания корпоративных порталов с элементами социальных сетей. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023665089, 12.07.2023.
236. S.V. Konstantinov, A.I. Diveev, G.I. Balandina, A.A. Baryshnikov Comparative Research of Random Search Algorithms and Evolutionary Algorithms for the Optimal Control Problem of the Mobile Robot // Procedia Computer Science, 150 (2019), pp. 462-470
237. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Климочкина М.А., Попова Т.В. Метод формирования контента для тематических порталов на основе интеллектуального анализа данных // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2023. – Т. 28. – № 3. – С. 368-377.
238. Федосов В.В., Орлов В.И. Минимально необходимый объем испытаний изделий микроэлектроники на этапе входного контроля // Изв. ВУЗов. Приборостроение, 2011. № 54 (4). С.68-62. 232.
239. Shevnina, Ju.S., Gagarina, L.G., Litvinova S.N. The method of adapting user interfaces to the terminology of the subject area in educational SMART systems // AIP Conference Proceedings 2475, 2021. С. 345.
240. Kuzmich R. I. et al. Application of informative patterns in the classifier for a logical data analysis method development. // IOP Conf. Series: materials Science and Engineering 450,

2018. 052005.
241. Улитина П.А., Шевнина Ю.С. Сравнительный анализ средств подбора кадров в IT-индустрии // В сборнике статей Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании». Волгоград. 2023. С. 88-92.
242. Henon M. A two dimensional mapping with a strange attractor // Commun. Math. Phys. 1976. vol. 50. no. 1. pp. 69–77.
243. Шевнина Ю.С., Буравов А.Н. Разработка автоматизированной системы учета рабочего времени сотрудников предприятия // Программные продукты и системы. Т. 35. № 1, 2022. С. 561–566.
244. I. Nekorkin and V.B. Kazantsev. Oscillatory dynamics of spiking neurons and modeling memory functions / In: Chris Forsythe et al. (Eds.) Russian Cognitive Neuroscience: Historical and Cultural Context. – N.Y.: CreateSpace Independent Publishing, 2015. pp. 267–294.
245. Шевнина Ю.С., Константинов В.В. Автоматизация оценки профессиональных качеств и компетенций сотрудников предприятия // Вестник Астраханского государственного технического университета, Том 2021 Номер 2 (72). С. 7-14.
246. Мищенко М.А., Большаков Д.И., Матросов В.В. Аппаратная реализация нейроподобного генератора с импульсной и пачечной динамикой на основе системы фазовой синхронизации // Письма в ЖТФ. 2017. т. 43. № 13. с. 10-18.
247. Шевнина Ю.С. Автоматизация оценки состояния электросети в удаленных районах России с использованием смарт-структур // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. №2. С. 197–206.
248. Cuomo K.M., Oppenheim A.V. Circuit implementation of synchronised chaos with application to communications // Phys. Rev. Lett. 1993. vol. 71. no. 1. pp. 65–68. 53. Downes P. Secure communication using

- chaotic synchronisation // SPIE. Chaos in Communications. 1993. pp. 227–233. 54
249. Шевнина Ю.С., Прокофьев А.В., Си Ту Тант Син, Конюхов Е.В. Проблемы разработки специализированного программного модуля для автоматизации учета кадров в учреждении // Автоматизация. Современные технологии. Т.78, № 1. 2024, С. 35-40.
250. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Литвинова С.Н. Программное обеспечение для формирования индивидуальной траектории обучения. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022619038, 18.05.2022.
251. Шевнина Ю.С. Автоматический поиск решения в информационно-управляющей системе для контроля состояния производственной среды // Интеллектуальные системы в производстве. Том 22 № 2, 2024, С. 41-47.
252. Игнатова И.Г., Шевнина, Ю.С. Организация проверки контрольных работ удаленных студентов с помощью электронных средств // Новые информационные технологии в университетском образовании: тезисы XI Международной научно-методической конф. / ИНТ. – Кемерово, 2006. – С. 221-222.
253. Шевнина Ю.С. Автоматизация мониторинга параметров производственной среды с использованием смарт структур // Автоматизация. Современные технологии. Т.76, № 10. 2022, С. 443-449.
254. Шевнина Ю.С. Управление системой контроля поверхностных дефектов изделий микроэлектроники // Вестник Тамбовского государственного технического университета. №3, 2024, С. 74-80.
255. Игнатова И.Г., Чаплыгин Ю.А., Шевнина Ю.С. Модель организации представлений информационных ресурсов с учетом онтологии предметной области деятельности // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: сб. тезисов постерных докладов Восьмой Всероссийской

- научной конф. (RCDL'2006) / Ярославский гос. университет им. П.Г. Демидова. – Ярославль, 2006. – С. 29-30.
256. Gagarina L.G., Litvinova S.N., Shevnina Ju.S. The concept of continuing engineering and science education, LAP, 2021. 81 с. ISBN: 978-620-3-86372-7.
257. Shevnina, Ju.S., Gagarina, L.G., Chirkow, A.V. Information accompaniment of the educational process of realization in the sustainable development interests at the University // E3S Web of Conferences, 2021. Т. 295. С. 13.
258. Жданова И.В., Шевнина Ю.С. Лабораторный практикум по курсу «Основы деловой графики» — М, МИЭТ, 2011 г.
259. Шевнина Ю.С., Игнатова И.Г. Технология подготовки и проведения учебных мероприятий в сетевой среде поддержки обучения: методические рекомендации для преподавателей.; Московский гос. ин-т электронной техники (техн. ун-т). – М.: МИЭТ, 2007. - 30 с.
260. Шевнина, Ю.С., Игнатова И.Г. Методические указания для студентов по работе с электронными модулями в среде поддержки обучения ОРОКС. – М. : МИЭТ, 2007. – 20 с.
261. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Литвинова С.Н. Программное обеспечение для проектирования обучающего STEAM-сценария. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022618974, 18.05.2022.
262. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Дюжев Н.А., Кремер Е.А. Программный модуль симуляции управления вакуумной установкой для автоматизации производства изделий микроэлектроники. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669637, 21.10.2022.
263. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Машевич П.Р., Тихонов М.Р. Программа имитации управления динамической маской нанолитографа. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669636,

21.10.2022.

264. Шевнина Ю.С., Портнов Е.М., Дорогов В.Г., Машевич П.Р. Программный модуль стенда управления совмещением компонентов при литографии. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669635, 21.10.2022.
265. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Марина А., Тегин А.Д., Герасимов В.В. Программное обеспечение для выявления дефектов в изделиях микроэлектроники с использованием нейросетевых технологий. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2024612516. 01.02.2024.
266. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Рубцов Ю.В. Алгоритм обнаружения поверхностных дефектов изделий микроэлектроники в рамках системы выходного контроля качества// Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2024. – Т. 29. – № 4. – С. 532-539.
267. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Зинченко Я.И., Сорокин М.В. Формирование траектории развития специалистов с применением методов машинного обучения // Научно-технический вестник-Поволжья. – 2023. – №11 – С. 404-407.
268. Федюнина Е.А., Шевнина Ю.С. Использование многокритериальной теории полезности для определения приоритетности выпуска документации по проектам в условиях ограниченности ресурсов // Системы компьютерной математики и их приложения: межвузовский сборник научных трудов. Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2024. Вып. 25. – С. 197-205.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР
Национального исследовательского
университета «МИЭТ»



С.А. Гаврилов

2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор
АО «Микрон»



Е.В. Шмаков

2024 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С.
на соискание ученой степени доктора технических наук**

Мы, нижеподписавшиеся, представители Акционерного общества «Микрон», Заместитель Главного конструктора, к.т.н. А.В. Бумагин, Начальник Отдела новых продуктов А.В. Шипигузов, с одной стороны, и представители Национального исследовательского университета «МИЭТ», заместитель директора института Системной и программной инженерии и информационных технологий по научной работе, д.т.н., профессор Портнов Е.М., к.т.н., доцент Федоров А.Р., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что разработанный в рамках диссертационной работы Шевниной Ю.С. алгоритм управления устойчивостью информационно-измерительных и управляющих систем использовался на этапе отладки производства отечественного RISC-V микроконтроллера MIK32 «АМУР».

от НИУ МИЭТ

Зам. директора института СПИНТех
по научной работе, д.т.н., проф.

Портнов Е.М.

К.т.н., доцент

Федоров А.Р.

от АО «Микрон»

Заместитель Главного конструктора,
к.т.н.

А.В. Бумагин

Начальник Отдела новых продуктов

А.В. Шипигузов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по ИР
Национального исследовательского
университета «МИЭТ»



С.А. Гаврилов

_____ 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор
ООО «НМ-Тех»



Царапкин С.Ф.

_____ 2024 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С.
на соискание ученой степени доктора технических наук**

Мы, нижеподписавшиеся, представители Общества с ограниченной ответственностью «НМ-Тех», директор Научно-технологического центра к.т.н. Семенов М.Ю., главный конструктор к.т.н. Лебедев А.В., с одной стороны, и представители Национального исследовательского университета «МИЭТ», директор института Системной и программной инженерии и информационных технологий, д.т.н., профессор Гагарина Л.Г., д.т.н., профессор Портнов Е.М., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Шевниной Ю.С. в части алгоритма принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей информационно-измерительной и управляющей системы прошли апробацию по применению в составе системы управления в режиме опытной эксплуатации на тестовой производственной линии изготовления микросэлектронных компонентов.

от НИУ МИЭТ

директор института СПИНТех,
д.т.н., проф.

 Гагарина Л.Г.

д.т.н., проф.

 Портнов Е.М.

от ООО «НМ-Тех»

директор НПЦ, к.т.н.

 Семенов М.Ю.

главный конструктор, к.т.н.

 Лебедев А.В.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР

Национального исследовательского
университета «МИЭТ»



С.А. Гаврилов

« » 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор АО «ЦКБ «Дейтон»

Рубцов Ю.В.

2024 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С. на соискание ученой степени доктора технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, представители Акционерного общества «Центральное конструкторское бюро «Дейтон», директор по научно-техническому развитию д.и.н. Юдахин Ю.А., начальник ЦОК Шишкова Ю.М., с одной стороны, и представители Национального исследовательского университета «МИЭТ», директор института Системной и программной инженерии и информационных технологий, д.т.н., профессор Гагарина Л.Г., д.т.н., профессор Горбунов В.Л., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что разработанная в рамках диссертационной работы Шевниной Ю.С. методика построения информационно-измерительных и управляющих систем используется при построении технических комплексов визуального контроля качества корпусных изделий микроэлектроники.

от НИУ МИЭТ

директор института СПИИТех,
д.т.н., проф.

Гагарина Л.Г.

д.т.н., проф.

Горбунов В.Л.

от АО «ЦКБ «Дейтон»

директор по научно-техническому
развитию, д.и.н.

Юдахин Ю.А.

Начальник ЦОК

Шишкова Ю.М.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР
Национального исследовательского
университета «МИЭТ»



С.А. Гаврилов

_____ 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «ЭВМКомплект»



И.В. Морозов

_____ 2024 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С.
на соискание ученой степени доктора технических наук**

Мы, нижеподписавшиеся, представители Общества с ограниченной ответственностью «ЭВМКомплект», технический директор Макаров Э.В., начальник отдела производства Зайцева Н.И., с одной стороны, и представители Национального исследовательского университета «МИЭТ», зам. директора института Системной и программной инженерии и информационных технологий по научной работе, д.т.н., профессор Портнов Е.М., д.т.н., профессор Горбунов В.Л., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что разработанное в рамках диссертационной работы Шевниной Ю.С. техническое решение в виде смарт-компонента используется при диагностике и ремонте контрольно-измерительных приборов и средств измерений.

от НИУ МИЭТ

зам. директора института СПИНТех по
научной работе, д.т.н., проф.

_____ Портнов Е.М.

д.т.н., проф.

_____ Горбунов В.Л.

от ООО «ЭВМКомплект»

технический директор

_____ Макаров Э.В.

начальник отдела производства

_____ Зайцева Н.И.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР
Национального исследовательского
университета «МИЭТ»



С.А. Гаврилов

«_____» 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «ИММЕРС»



Амелькин

«_____» 2024 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С.
на соискание ученой степени доктора технических наук**

Мы, нижеподписавшиеся, представители Общества с ограниченной ответственностью «ИММЕРС», главный конструктор Лопатин Ю.В., начальник отдела перспективных разработок и исследований Хребтовский И.С., с одной стороны, и представители Национального исследовательского университета «МИЭТ», директор института Системной и программной инженерии и информационных технологий, д.т.н., профессор Гагарина Л.Г., д.т.н., профессор Портнов Е.М., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что разработанный в рамках диссертационной работы Шевниной Ю.С. алгоритм анализа и прогнозирования изменения состояния информационно-измерительных и управляющих систем используется при проведении НИР, посвященных системам охлаждения высокопроизводительных вычислительных комплексов.

от НИУ МИЭТ

директор института СПИНТех,
д.т.н., проф.

Гагарина Л.Г.

д.т.н., проф.

Портнов Е.М.

от ООО «ИММЕРС»

главный конструктор

Лопатин Ю.В.

начальник отдела перспективных
разработок и исследований

Хребтовский И.С.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР
Национального исследовательского
университета «МИЭТ»



С.А. Гаврилов

2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
Общества с ограниченной
ответственностью «Просенсор Сервис»



Кринов И.Н.

2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С.
на соискание ученой степени доктора технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, представители Общества с ограниченной ответственностью «Просенсор Сервис», коммерческий директор Баюшкин С.В., заместитель генерального директора Будаева М.В., с одной стороны, и представители Национального исследовательского университета «МИЭТ», директор института Системной и программной инженерии и информационных технологий, д.т.н., профессор Гагарина Л.Г., д.т.н., профессор Горбунов В.Л., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что разработанное в рамках диссертационной работы Шевниной Ю.С. техническое решение в виде смарт-компонента используется для оценки состояния и управления производственной средой предприятия.

от НИУ МИЭТ

директор института СПИНТех,
д.т.н., проф.

Гагарина Л.Г.

д.т.н., проф.

Горбунов В.Л.

от ООО «Просенсор Сервис»

коммерческий директор

Баюшкин С.В.

заместитель генерального директора

Будаева М.В.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР



Национального исследовательского
университета «МИЭТ»

С.А. Гаврилов

« » 2024 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С. на соискание ученой степени доктора технических наук

Результаты диссертационной работы Шевниной Ю.С. «Информационно-измерительные и управляющие системы производственными процессами для микро- и нанoeлектроники» использованы в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» при выполнении НИР:

1) «Разработка и создание универсальной открытой программно-аппаратной платформы для проектирования устройств обработки потокового видео для беспилотных летающих аппаратов мониторинга экологической ситуации и состояния природных объектов» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2021 годы»;

2) «Разработка установки безмасочной рентгеновской нанолитографии на основе МЭМС динамической маски для формирования наноструктур с размерами от 13 нм и ниже на базе синхротронного и/или плазменного источника» (номер государственного учета в ЕГИСУ НИОКТР 121122300062-4);

3) «Выполнение работ по подготовке документации эскизно-технического проекта на операционную систему защищенной микросхемы для SIM-карты» (номер государственного учета в ЕГИСУ НИОКТР 123120100022-4).

Директор института СПИНТех,
д.т.н., проф.

 Гагарина Л.Г.

Зам. директора института СПИНТех
по научной работе, д.т.н., проф.

 Портнов Е.М.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по УР

Национального исследовательского
университета «МИЭТ»



_____ А.Г. Балашов

« _____ » _____ 2024 г.

АКТ

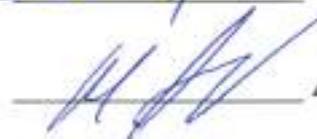
**об использовании результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С.
на соискание ученой степени доктора технических наук**

Результаты диссертационной работы Шевниной Ю.С. «Информационно-измерительные и управляющие системы производственными процессами для микро- и наноэлектроники» используются в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» при чтении лекций и проведении семинаров, лабораторных работ для бакалавров и магистрантов по 6 дисциплинам: «Теория систем и системный анализ», «Функциональное и логическое программирование», «Разработка программного обеспечения информационных систем», «Программная инженерия управляющих систем», «Проектирование и архитектура программных систем», «Информационные системы и технологии».

Директор института СПИНТех
д.т.н., проф.

 Гагарина Л.Г.

Зам. директора института СПИНТех
по учебной работе, к.т.н., доц.

 Акуленок М.В.



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ИУПИ ВО «МУППИ»

В.В. Борисова

2024 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С. на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящим подтверждаем, что полученные результаты диссертационной работы Шевниной Ю.С. «Информационно-измерительные и управляющие системы производственными процессами для микро- и нанoeлектроники» используются в негосударственном образовательном частном учреждении высшего образования «Международный университет психолого-педагогических инноваций» для управления процессом построения индивидуальной образовательной траектории обучающегося. Внедрение результатов диссертационной работы Шевниной Ю.С. позволило в 2,5 раза повысить эффективность подбора дополнительных образовательных программ (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022619038, 18.05.2022).

Первый проректор

Проректор по научной работе
к.п.н., доц.


Потапова М.Г.


Диниц Г.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМОЙ ДЛЯ ПРОЦЕССА НАНОЛИТОГРАФИИ**1. Запуск и отключение программы**

Запуск программы и ее отключения соответствует запуску и отключению любой программы под операционной системы Windows.

1.1. Запуск программы

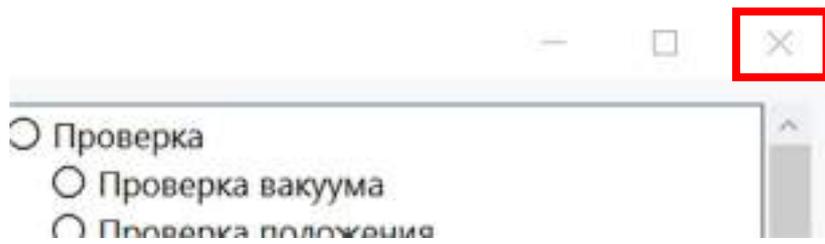
Запуск программы производится путем двойного нажатия левой клавишей мыши по исполняемому файлу Litograph.exe в корневом каталоге программы.



При успешном запуске программы откроется ее окно.

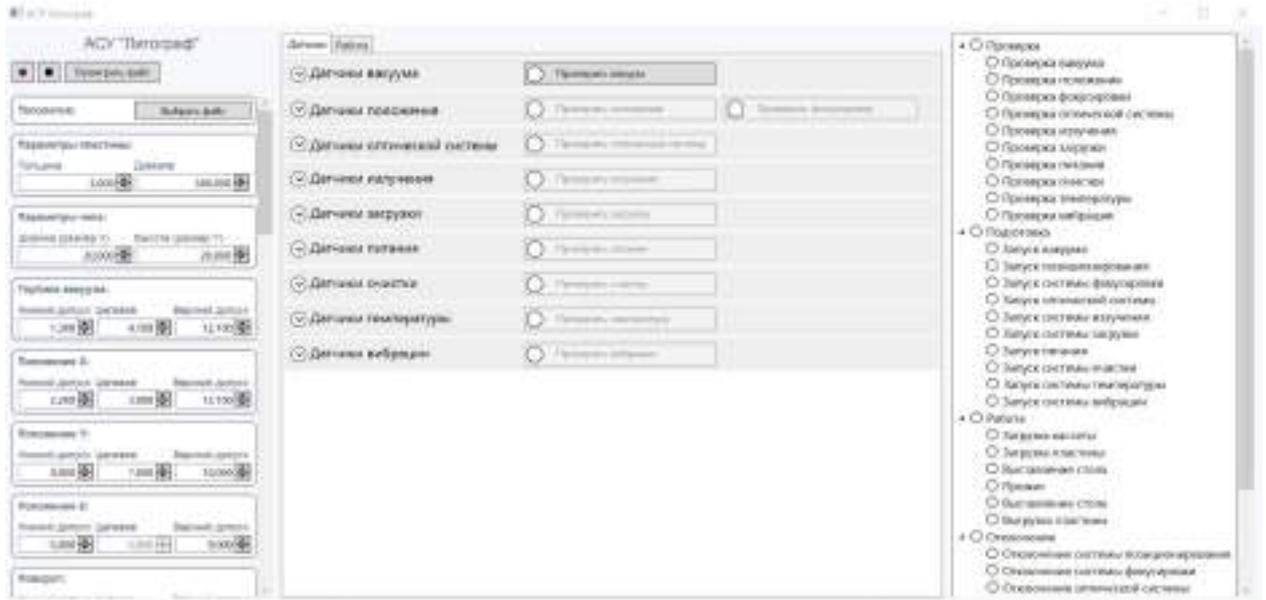
1.2. Отключение программы

Отключение программы производится путем одинарного нажатия левой клавишей мыши по кнопке закрытия окна в правом верхнем углу.



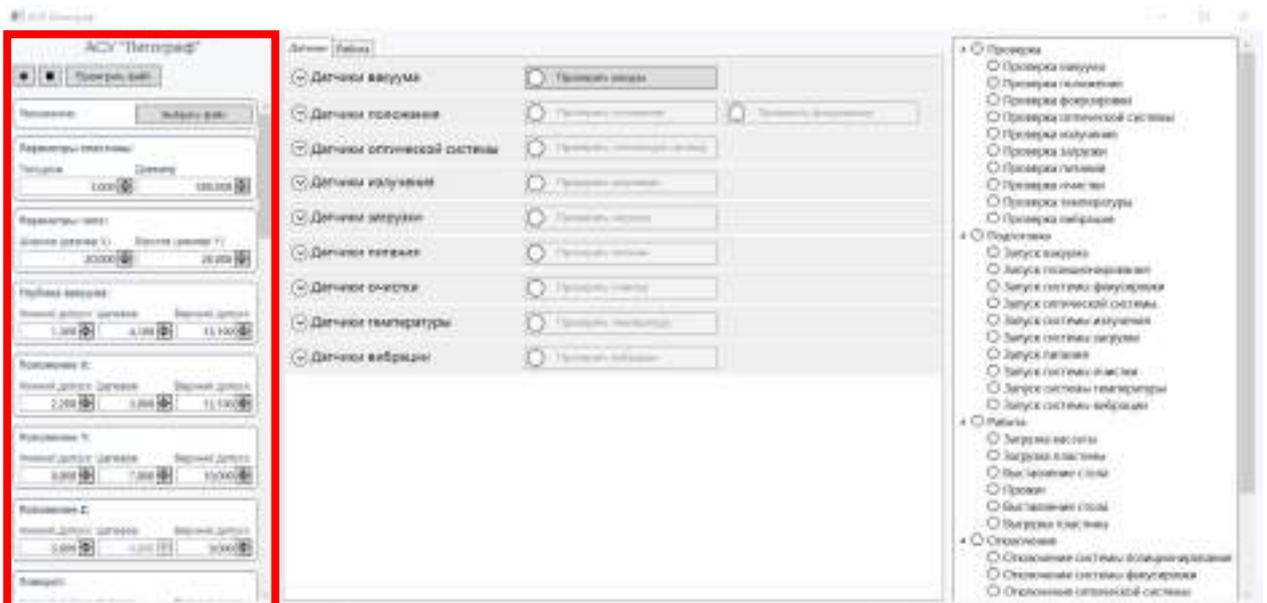
2. Интерфейс программы

Интерфейс программы соответствует классическому оконному приложению операционной системы Windows.



2.1. Панель настроек

Панель настроек располагается в левой части окна приложения.

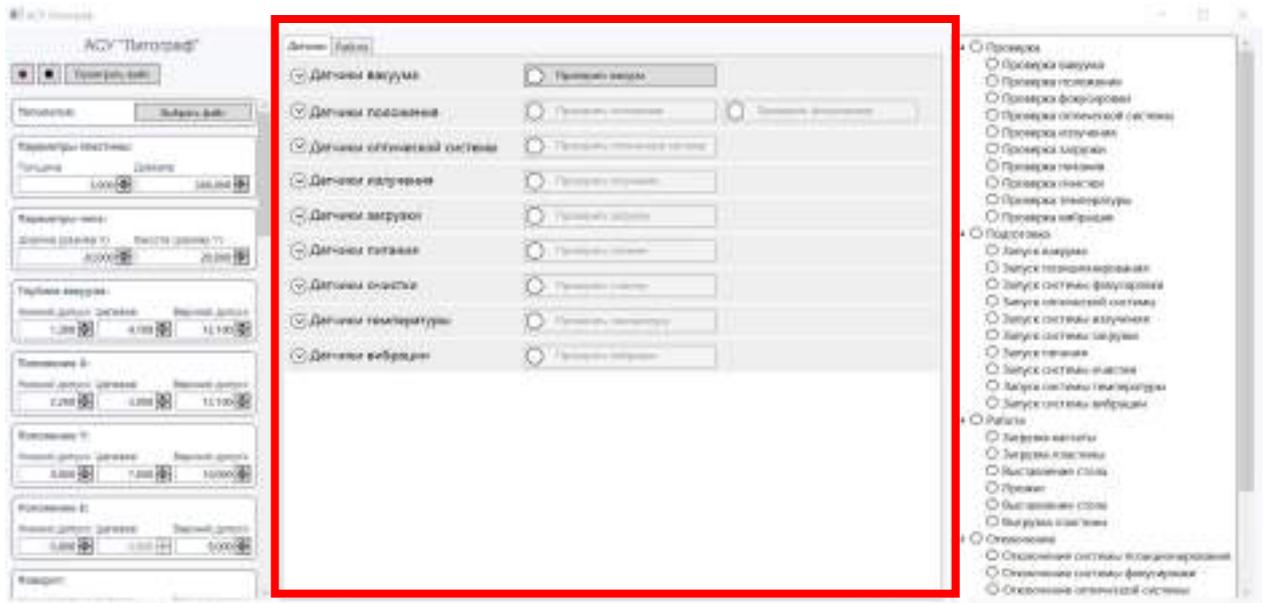


Она содержит поля ввода данных характеристик работы программы, таких как:

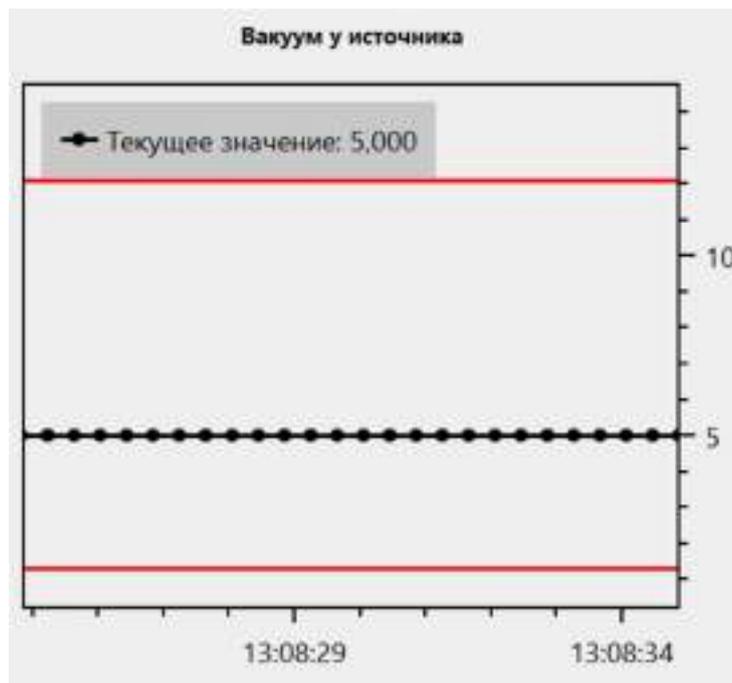
- топология;
- толщина и диаметр пластины;
- ширина и высота чипа;
- допуски и целевое значение глубины вакуума;
- допуски и целевое значение положения стола по оси X;
- допуски и целевое значение положения стола по оси Y;
- допуски и целевое значение положения стола по оси Z;
- допуски и целевое значение поворота стола;
- допуски и целевое значение скорости стола;
- допуски и целевое значение мощности источника излучения;
- допуски и целевое значение выходного тепла источника излучения;
- допуски и целевое значение скорости вращения источника излучения;
- допуски и целевое значение скорости работы роботизированной руки загрузчика;
- допуски и целевое значение напряжения источника питания;
- допуски и целевое значение силы тока источника питания;
- допуски и целевое значение частоты тока источника питания;
- допуски и целевое значение количества частиц у источника;
- допуски и целевое значение количества частиц в камере;
- допуски и целевое значение температуры у источника;
- допуски и целевое значение температуры в камере;
- допуски и целевое значение температуры пластины;
- допуски и целевое значение температуры оптической системы;
- допуски и целевое значение вибрации у источника;
- допуски и целевое значение вибрации в камере;
- допуски и целевое значение вибрации пластины;
- допуски и целевое значение вибрации оптической системы;
- период импульса.

2.2. Панель датчиков

Панель датчиков располагается в средней части окна приложения в первой его вкладке.

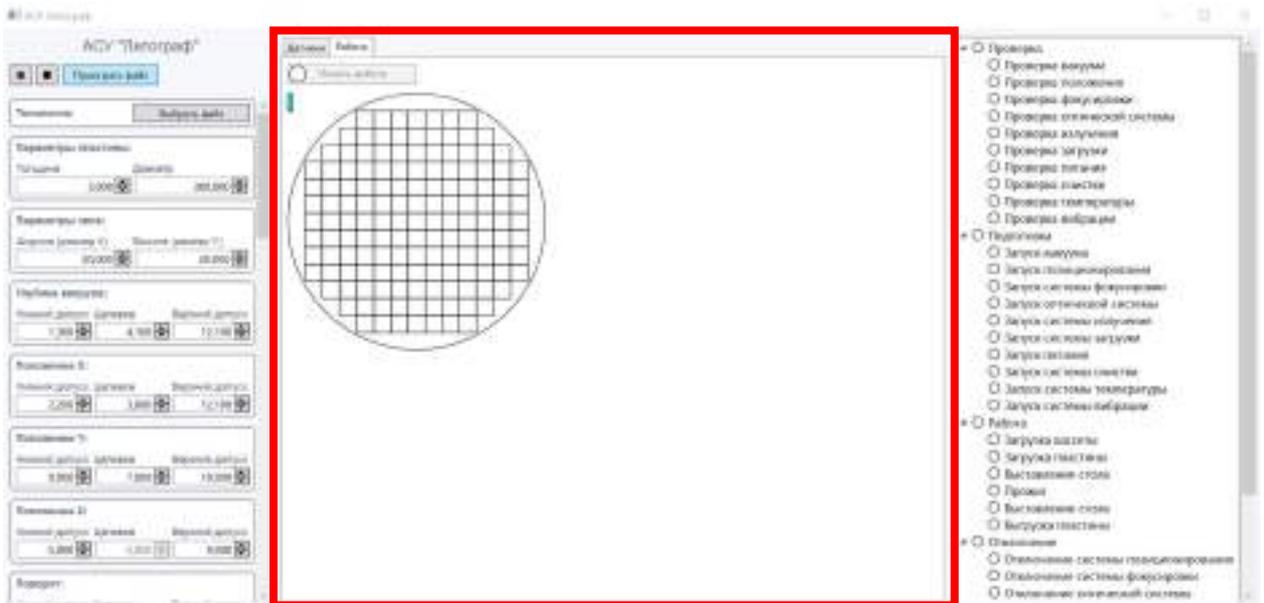


Она содержит наборы графиков (датчиков) изменения значений характеристик, соответствующих перечню, представленному в параграфе 2.1. Каждый датчик содержит текущее значение, нижнее и верхнее значения допуска, график текущего значения, деления значений и временную шкалу. Графики меняются во времени непрерывно с момента запуска программы.



2.3. Панель работы

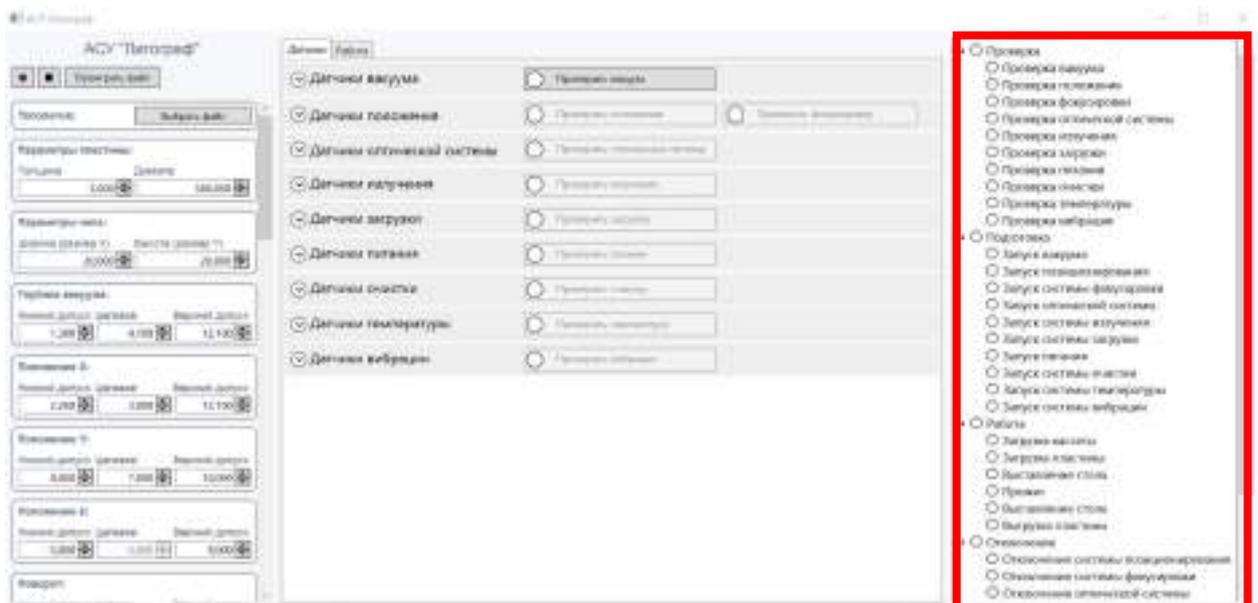
Панель работы располагается в средней части окна приложения во второй его вкладке.



Она содержит образ пластины с границами кадров.

2.4. Панель процедуры

Панель процедуры располагается в правой части окна приложения.



Она содержит последовательность процессов работы литографа с индикаторами их выполнения.

3. Операции пользователя

Работа пользователя в программе заключается в выполнении следующих действий:

1. Задание настроек работы литографа.
2. Проверка информации с датчиков.
3. Проверка работоспособности системы
4. Запуск работы системы.

3.1. Задание настроек

Задание настроек производится оператором непосредственно перед проведением проверки информации с датчиков. Оно заключается в выставлении значений характеристик, представленных в параграфе 2.1, в соответствующие поля.

3.2. Проверка информации с датчиков

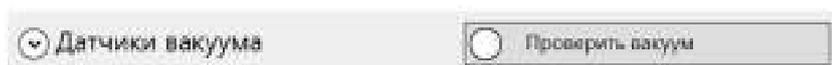
Проверка информации с датчиков осуществляется оператором на основе сопоставления допустимых значений с данными, отображенными на графиках датчиков.

3.3. Проверка работоспособности системы

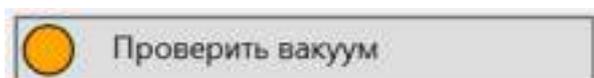
Проверка работоспособности системы осуществляется по инициации оператором системы, путем последовательного нажатия на кнопки проверок на панели датчиков.

3.3.1. Проверка вакуума

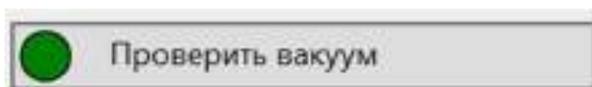
Первой выполняется проверка работоспособности системы вакуума. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить вакуум».



Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



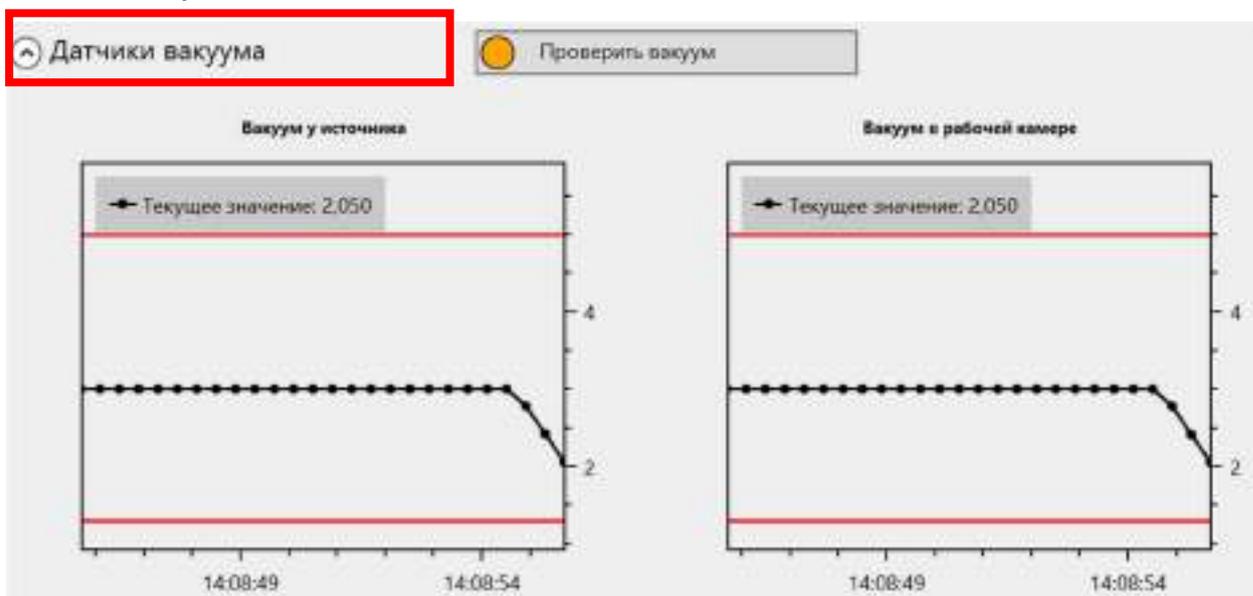
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.

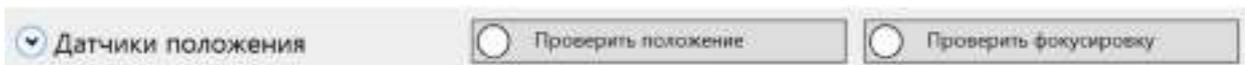


Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

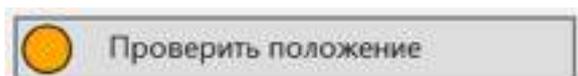


3.3.2. Проверка положения и фокусировки

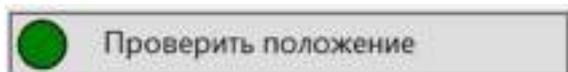
При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка положения и фокусировки. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить положение» и кнопку «Проверить фокусировку».



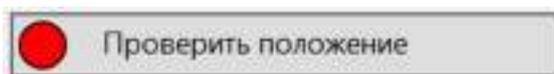
Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



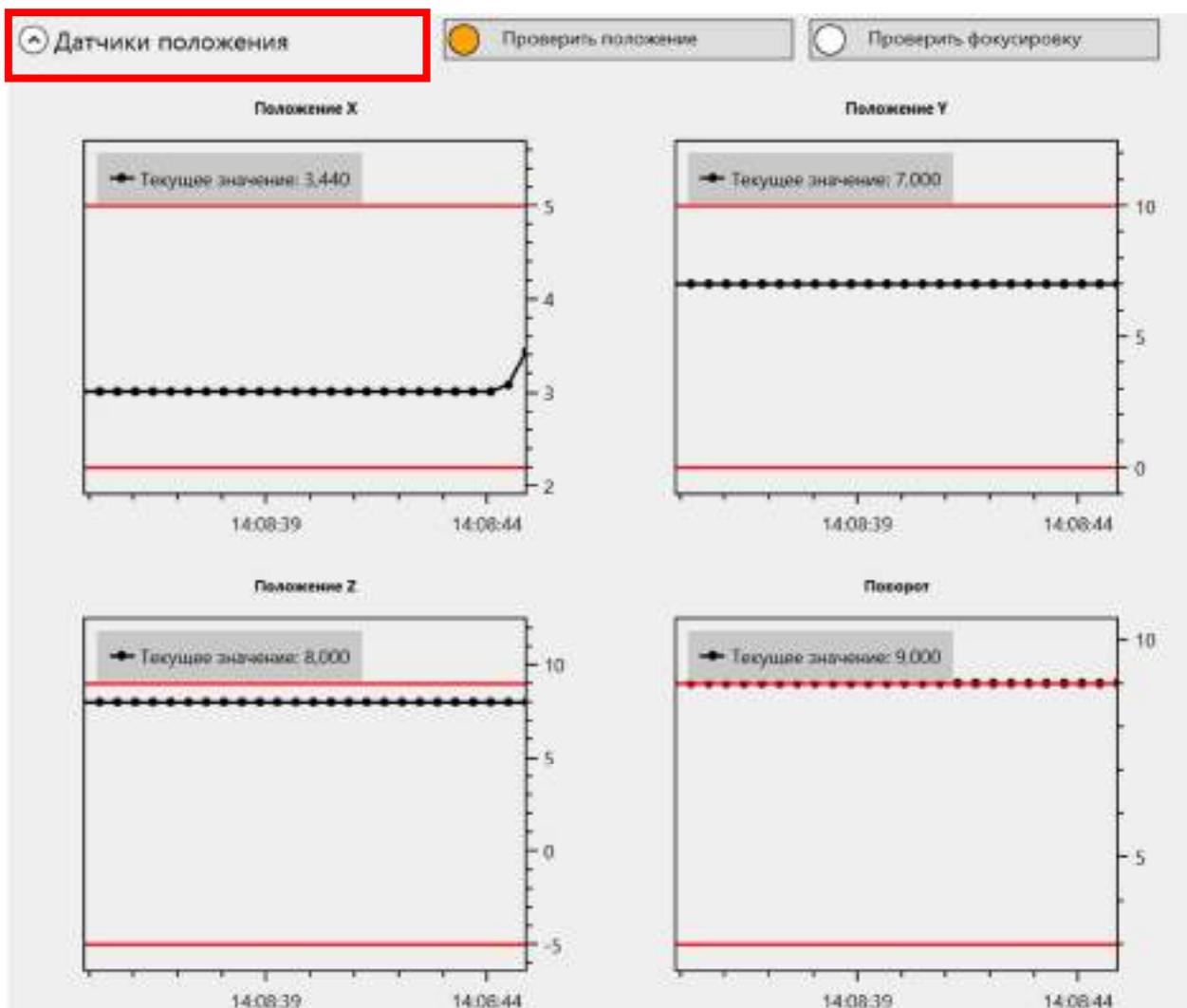
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.



Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

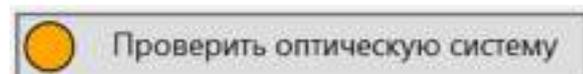


3.3.3. Проверка оптической системы

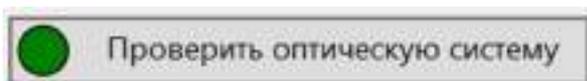
При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка оптической системы. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить оптическую систему».



Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.

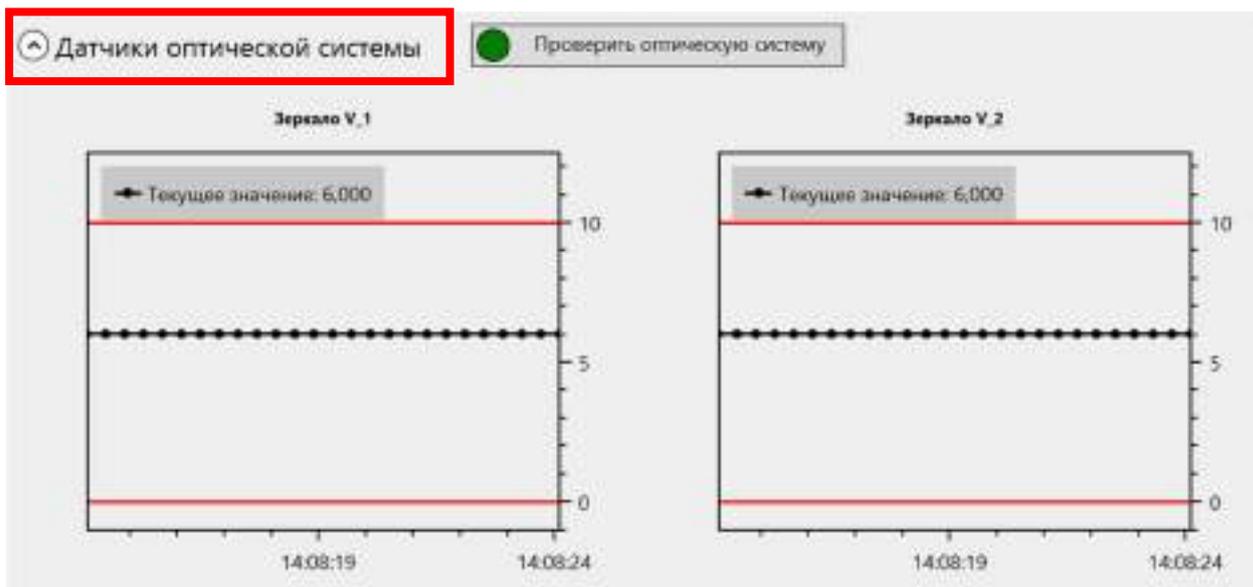


Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



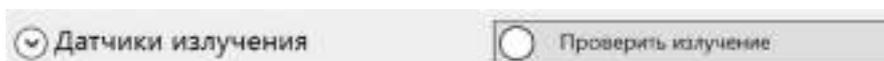
Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.

Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

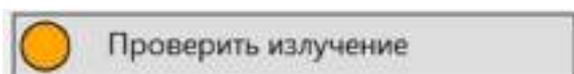


3.3.4. Проверка излучения

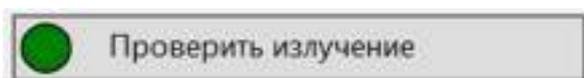
При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка излучения. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить излучение».



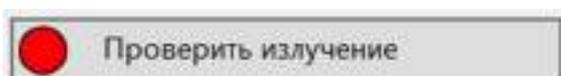
Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



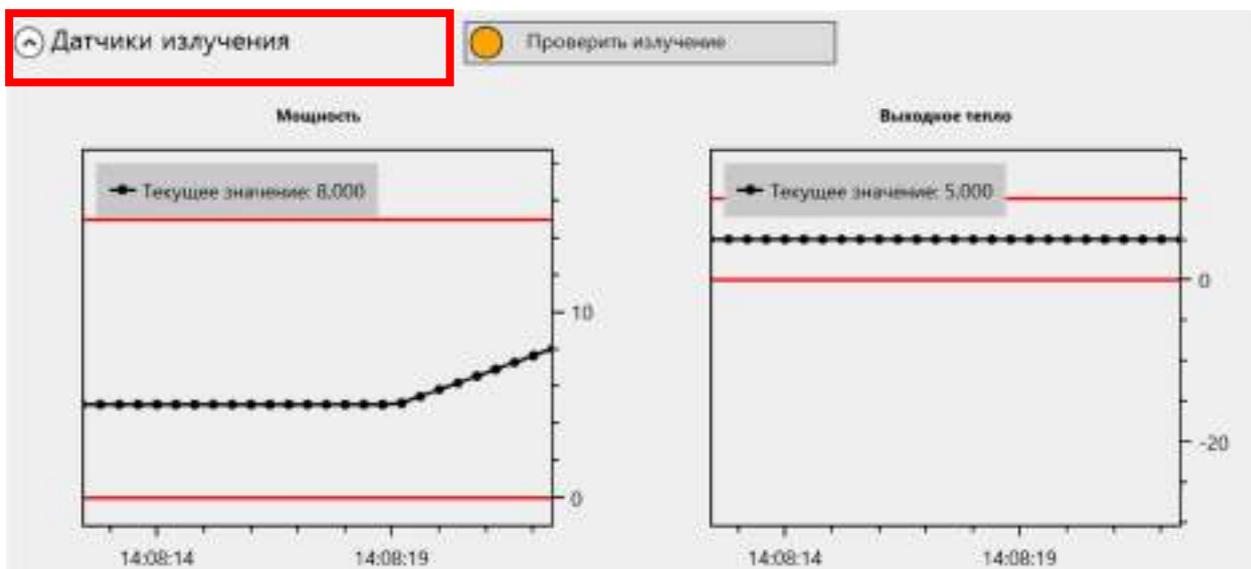
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.



Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

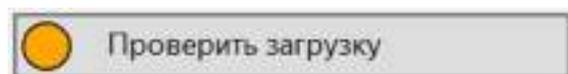


3.3.5. Проверка загрузки

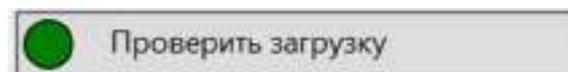
При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка загрузки. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить загрузку».



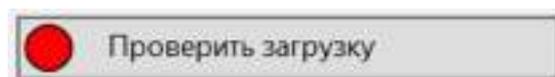
Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



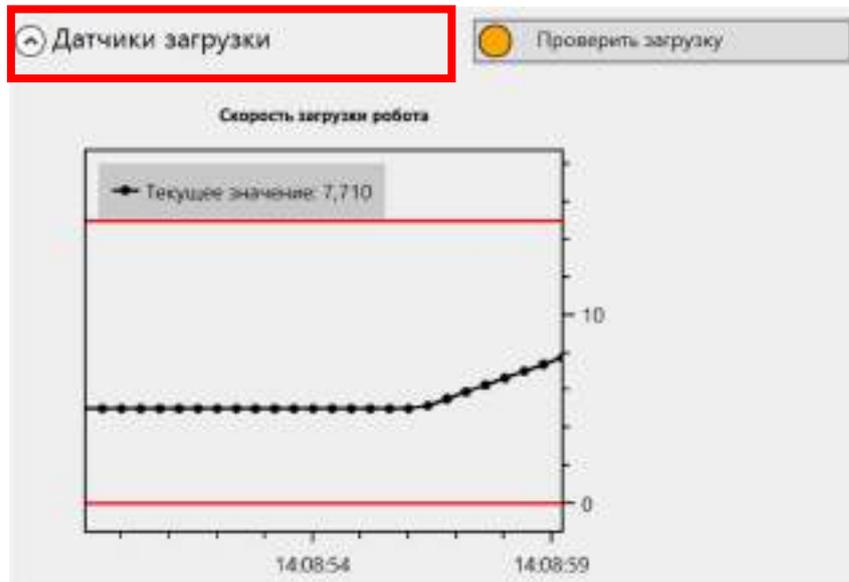
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.

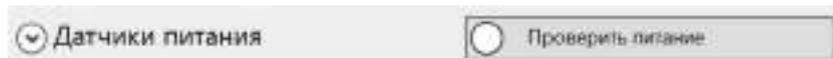


Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

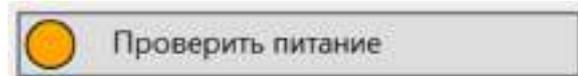


3.3.6. Проверка питания

При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка питания. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить питание».



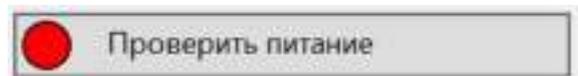
Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



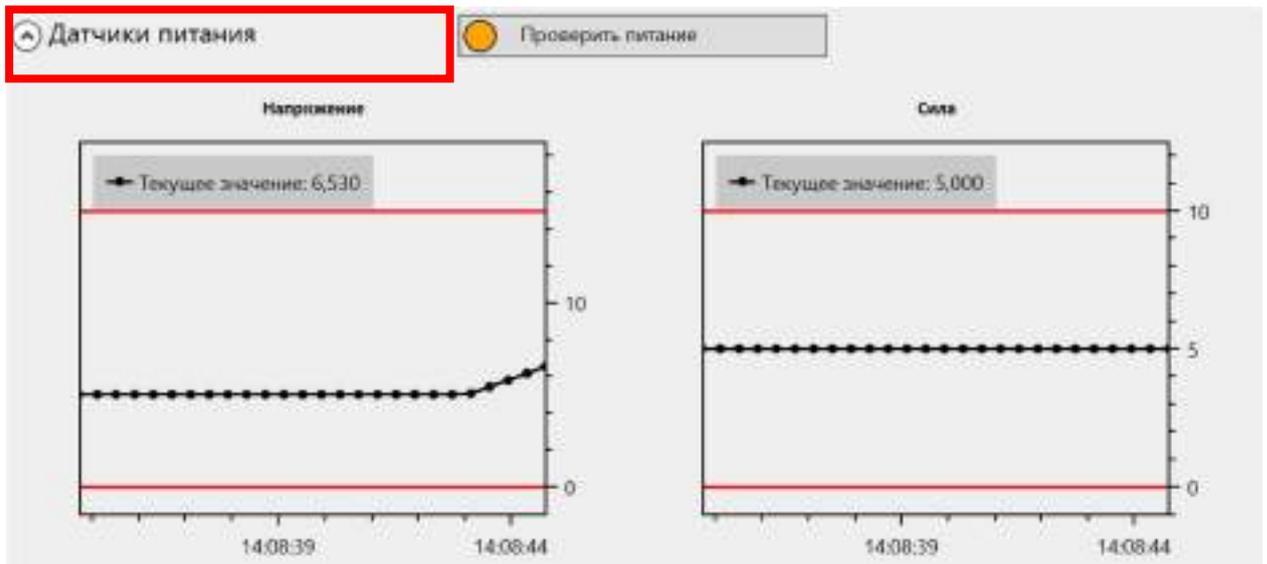
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.

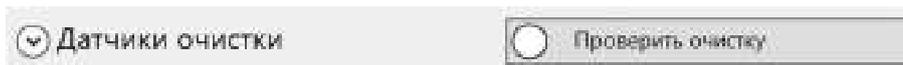


Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

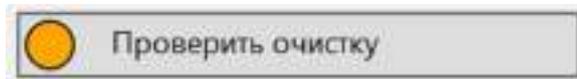


3.3.7. Проверка очистки

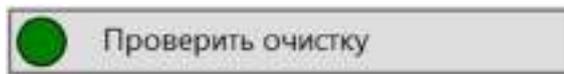
При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка очистки. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить очистку».



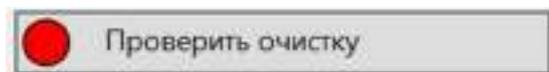
Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



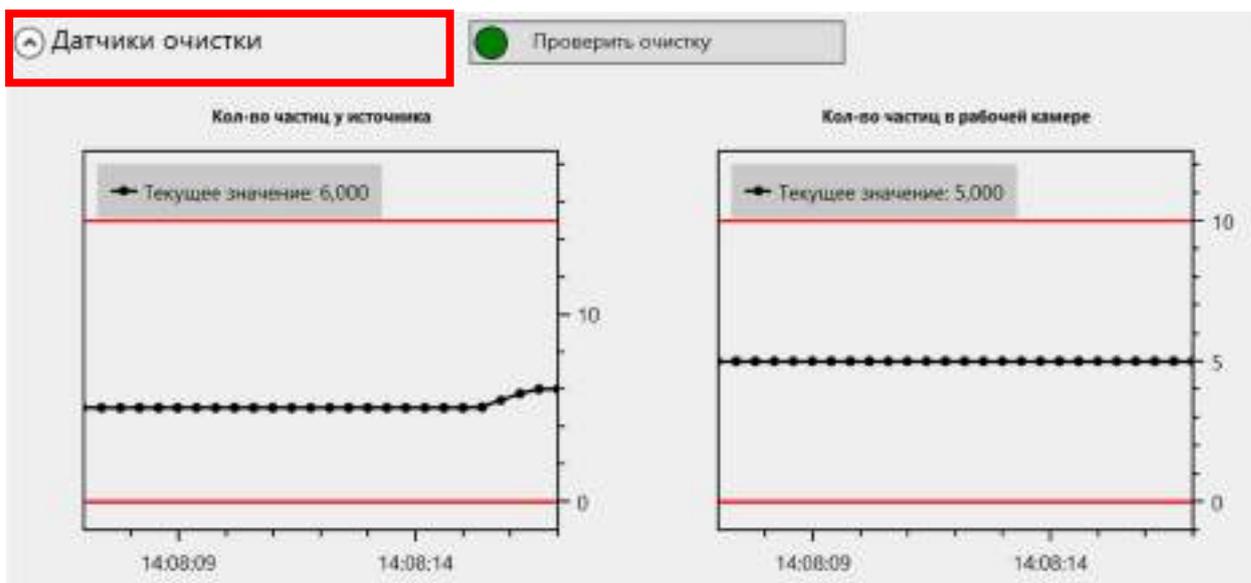
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.

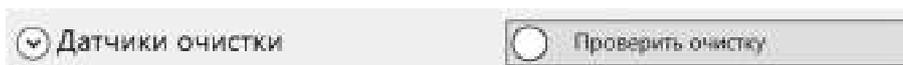


Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.



3.3.8. Проверка температуры

При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка температуры. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить температуру».



Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



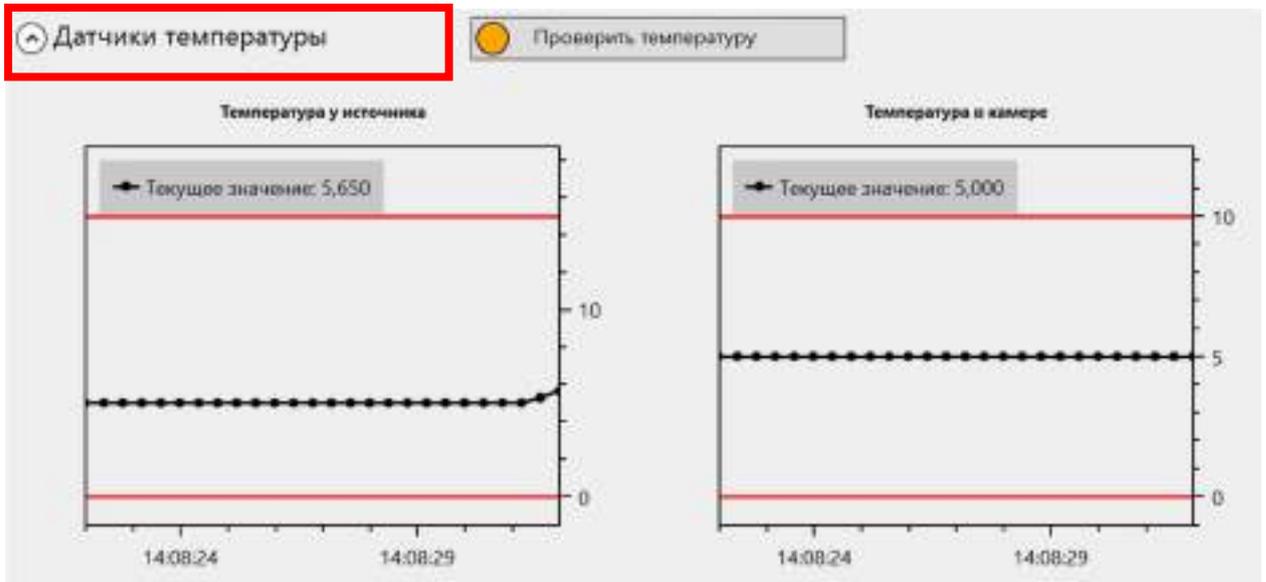
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.

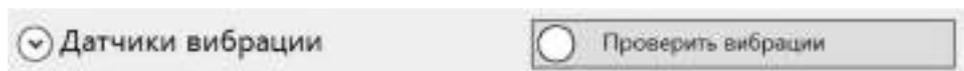


Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

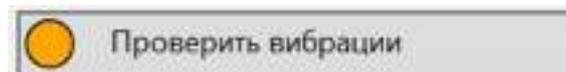


3.3.9. Проверка вибрации

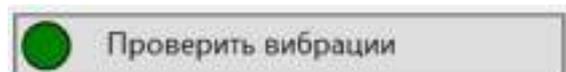
При корректном завершении проверки работы вакуумной системы выполняется проверка вибраций. Для этого оператор на панели датчиков нажимает левой клавишей мыши на кнопку «Проверить вибрации».



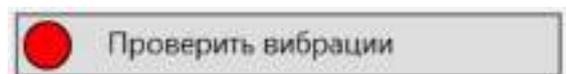
Индикатор окрасится в желтый цвет, означающий процесс работы.



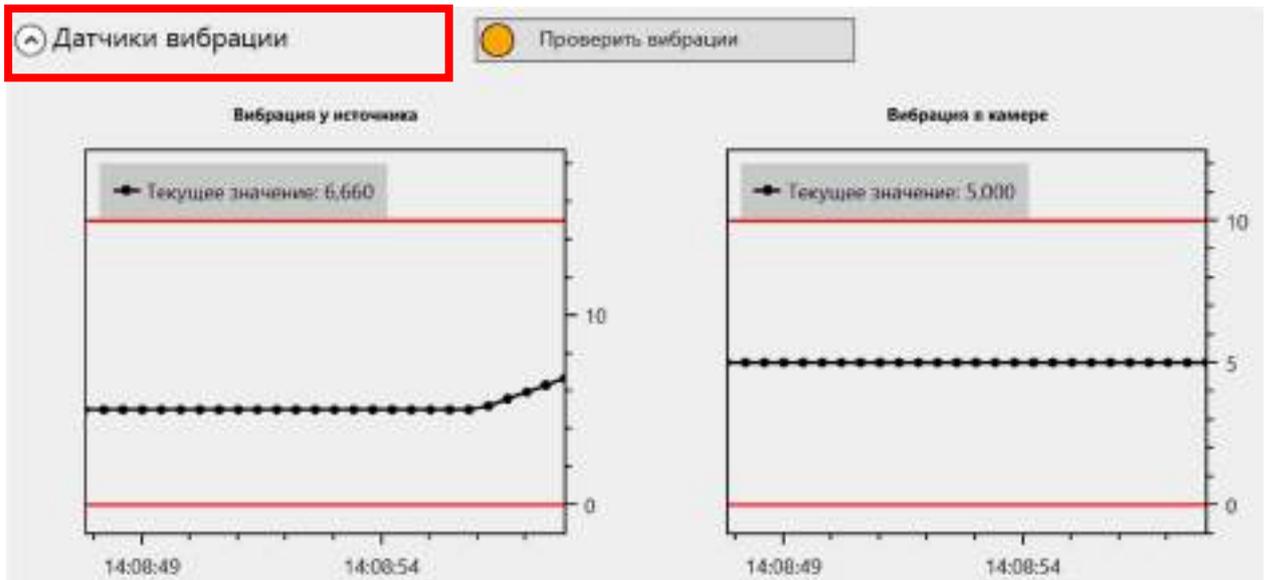
Если индикатор окрасится в зеленый цвет – работа завершена.



Если индикатор окрасится в красный цвет – произошла ошибка, вызванная выходом значения за допустимые границы.

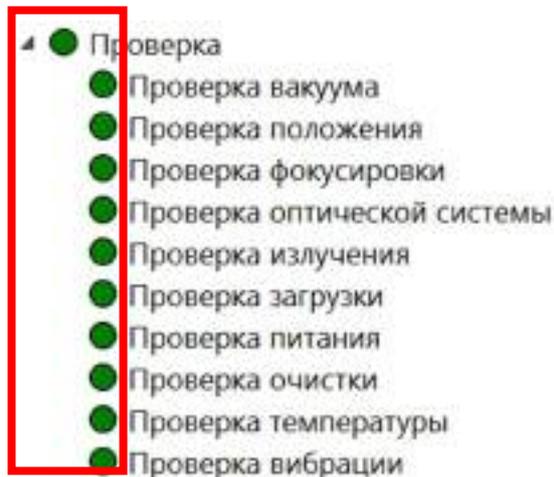


Для проверки изменения значения оператор может раскрыть выпадающую панель с датчиками.

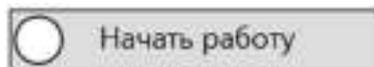


3.4. Работа системы

При корректном завершении всех проверок, соответствующие индикаторы на панели процедуры окрасятся в зеленый цвет.



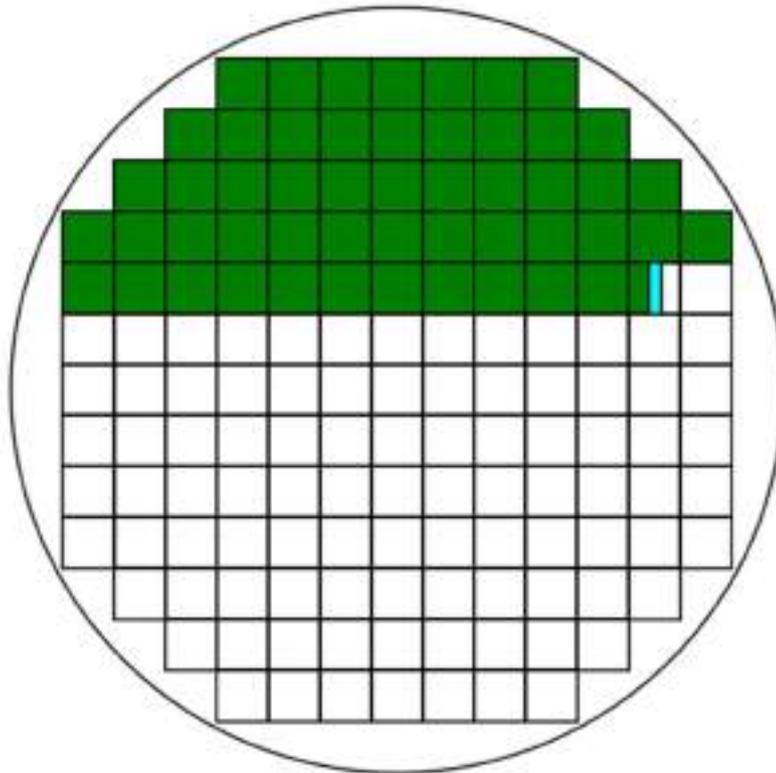
Если проверки были завершены корректно, оператор может запустить работу системы нажатием левой клавишей мыши на кнопку «Начать работу» на панели работы.



Работы будет выполняться в соответствии с процессами, представленными на панели процедуры.

- 4 ● Работа
- Загрузка кассеты
- Загрузка пластины
- Выставление стола
- Прожиг
- Выставление стола
- Выгрузка пластины

Процесс прожига сопровождается графическим представлением на панели работы.



Образец программного кода драйвера приведен в Приложении В.

3.5. Функционал программы

Программа позволяет:

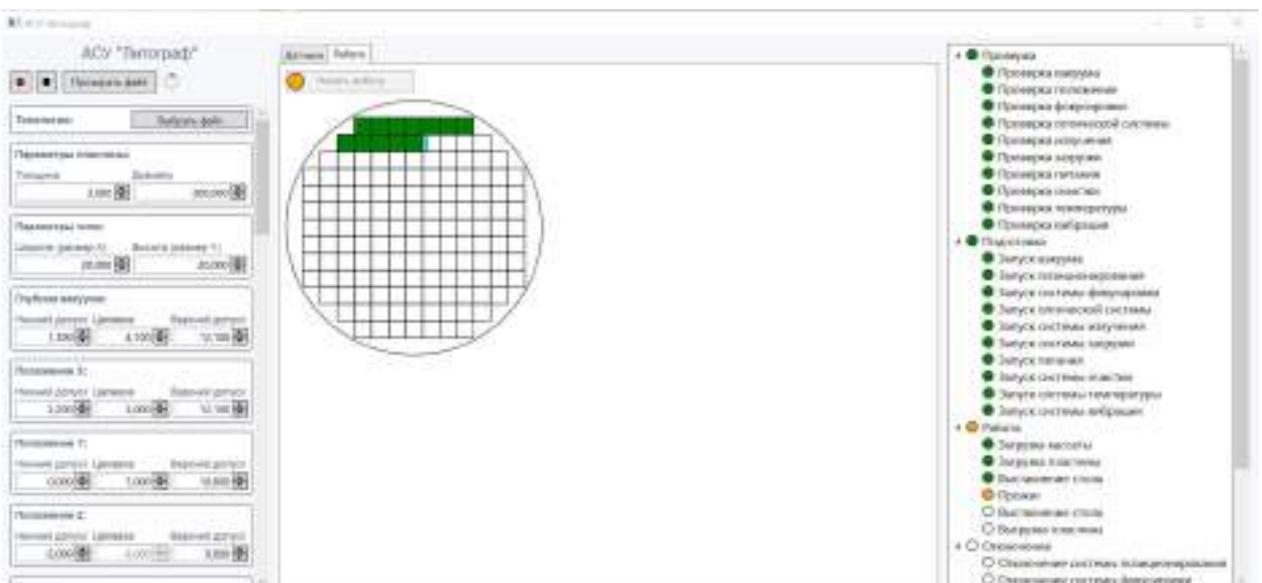
- 1) осуществлять просмотр информации с датчиков в режиме реального времени в рамках проверки состояния литографа.



2) проводить проверку состояния систем литографа.



3) отслеживать работу литографа по «прожигу».



4) отслеживать алгоритм работы литографа.



Программа позволяет моделировать работу литографа с различными входными параметрами, в том числе, имитирующими исключительные ситуации.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ФРАГМЕНТ ПРОГРАММНОГО КОДА МОДУЛЯ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ДЛЯ
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

1. Инициализация программы

```
<?php

namespace app\models\atp\dis;

use app\kernel\FloatSum;
use app\kernel\helper\DateHelper;
use app\kernel\Util;
use app\models\atp\Ball;
use app\models\atp\competence\Competence;
use app\models\atp\Consultation;
use app\models\atp\DebtKm;
use app\models\atp\group\Group;
use app\models\atp\ir\LinkIrDis;
use app\models\atp\LinkConsDisGroup;
use app\models\atp\LinkTutorDis;
use app\models\atp\port\PortLinkProjectDis;
use app\models\atp\Science;
use app\models\atp\Semester;
use app\models\atp\Student;
use app\models\atp\up\UpType;
use app\models\user\User;
use app\models\user\UserProfile;
use DateTime;
use Yii;
use yii\base\Exception;
use yii\base\NotSupportedException;
use yii\base\UserException;
use yii\db\ActiveQuery;
use yii\helpers\ArrayHelper;
use yii\helpers\StringHelper;

/**
 * Карточка состояний
 *
 * @package kernel
 *
 * @property integer $id Идентификатор
 * @property integer $id_science Идентификатор карточки из ПУЛа
```

```

* @property integer $id_form_control Идентификатор формы
контроля
* @property string $name Название карточки
* @property string $sh Шифр карточки
* @property integer $plan_seminar
* @property integer $plan_lecture
* @property integer $plan_lab
* @property integer $plan_srs
* @property integer $zet
* @property integer|null $id_dis Идентификатор родительской
карточки
* @property boolean $km_sync Включена ли синхронизация с КМ из
родительской карточки
* @property integer $id_practice Идентификатор практики
* @property double $zet_week
* @property integer $plan_week
* @property integer $plan_hour
* @property integer $not_zet
*
* @property DisciplineSegment[] $segments
* @property DisciplineSegment[] $currentSegments
* @property DebtKm[] $debtKms
* @property Dis $parentDis
* @property Dis[] $childrenDises
* @property DisFormControl $formControl
* @property DisPractice $practice
* @property Science $science
* @property DisInfo[] $disInfos
* @property LinkIrDis[] $linkIrDis
* @property Competence[] $competencies
* @property Competence[] $inheritedCompetencies
* @property LinkTutorDis[] $linkTutorDis
* @property DisSession[] $disSessions
* @property PortLinkProjectDis[] $portLinkProjectDises
*
* @property DisciplineChoiceBlock|null $choiceBlock Блок
состояний по выбору
* @property DisciplineChoice|null $choice Логика для работы с
выбором состояний
* @property bool $isChoosable Карточка состояний является
состоянием по выбору
* @property bool $isChosen Карточка состояний выбрана хотя бы
одним технологом
*/
class Dis extends \app\models\AtpActiveRecord
{
    /**
     * @var DisInfo[] инфо о состояниях, проиндексированные по
id_stud
     */
    protected $_indexedDisInfos;
    /**

```

```

* Константа для заголовка объявления о неуспешных
результатах выборки
*/
const ANNOUNCEMENT_FAILED_DOLG = 'Результаты выборки;

/**
* @inheritdoc
*/
public static function tableName()
{
    return 'dis';
}

/**
* @inheritdoc
*/
public function rules()
{
    return [
        [['id_science', 'id_form_control', 'plan_seminar',
'plan_lecture', 'plan_lab', 'plan_srs', 'zet', 'id_dis',
'km_sync', 'id_practice', 'plan_week', 'plan_hour', 'not_zet'],
'integer'],
        [['zet_week'], 'number'],
        [['id_form_control', 'name'], 'required'],
        [['name'], 'string', 'max' => 512],
        [['sh'], 'string', 'max' => 45],
    ];
}

/**
* @inheritdoc
*/
public function attributeLabels()
{
    return [
        'id' => 'ID',
        'id_science' => 'Наука',
        'id_form_control' => 'Форма контроля',
        'name' => 'Название',
        'sh' => 'Шифр',
        'plan_seminar' => 'План семинаров',
        'plan_lecture' => 'План лекций',
        'plan_lab' => 'План лабораторных работ',
        'plan_srs' => 'План СРС',
        'zet' => 'ЗЕТ',
        'id_dis' => 'Родительская карточка состояний',
        'km_sync' => 'Синхронизация графика КМ с графиком
родительской карточки',
        //Далее названия для атрибутов из связанных таблиц
        'formControl.name' => 'Форма контроля',
        'id_practice' => 'Id Practice',
    ];
}

```

```

        'zet_week' => 'Zet Week',
        'plan_week' => 'Plan Week',
        'plan_hour' => 'Plan Hour',
    ];
}

/**
 * При удалении карточки из УП ставит статус изменения в УП
 * @inheritdoc
 */
public function afterDelete() {
    $this->markUpAsEditing();
}

protected function markUpAsEditing() {
    foreach($this->segments as $segment) {
        $up = $segment->upSegment->up;

        //Простановка статуса изменения в УП запустит
автоматически простановку статуса в дочерние УП
        //Поэтому здесь не надо проставлять статусы в
дочерние УП
        $up->status_edit=1;
        $up->save();
    }
}

/**
 * При редактировании карточки УП необходимо отредактировать
дочерние карточки
 * @var bool $insert
 * @var array $changedAttributes
 */
public function afterSave($insert, $changedAttributes) {
    $this->_choice = null;

    if(!$insert) {
        #=====В этом блоке исследуем соблюдено ли
хоть одно условие, для изменения статуса у УП=====
        if(ArrayHelper::keyExists('name',
$changedAttributes)) goto changeDis;
        if(ArrayHelper::keyExists('sh', $changedAttributes))
goto changeDis;
        if(ArrayHelper::keyExists('id_form_control',
$changedAttributes)) goto changeDis;

        goto noChangeDis;
        #-----Если хоть какое-то условие соблюдено,
то кидаем сюда-----
        changeDis:
        $this->markUpAsEditing();
    }
}

```

```

=====
noChangeDis:

    }

    if($this->km_sync==1 and
ArrayHelper::getValue($changedAttributes,'km_sync',1)==0) {
        $parent_segments =
DisciplineSegment::findAll(['id_dis' => $this->id_dis]);
        $parent_segment = current($parent_segments); // TODO

        foreach ($this->segments as $segment){
            foreach ($segment->allKms as $km){
                $km->delete();
            }
            $segment->importKmScheduleFrom($parent_segment);
        }
    }

    if($this->km_sync==0 and
ArrayHelper::getValue($changedAttributes,'km_sync',0)==1) {
        foreach ($this->segments as $segment){
            foreach ($segment->allKms as $km){
                $km->id_km=null;
                $km->save();
            }
        }
    }
    parent::afterSave($insert, $changedAttributes);
}

/**
 * @return DisciplineQuery
 */
public static function find() {
    /** @noinspection PhpIncompatibleReturnTypeInspection */
    return Yii::createObject(DisciplineQuery::class,
[get_called_class()]);
}

/**
 * @return ActiveQuery
 */
public function getSegments() {
    return $this->hasMany(DisciplineSegment::class,
['id_dis' => 'id']->inverseOf('discipline'));
}

/**
 * @return ActiveQuery

```

```

    */
    public function getCurrentSegments() {
        return $this->getSegments()
            ->innerJoinWith(['upSegment' => function(ActiveQuery
    $q) {
                $q->andWhere(['up_segment.id_semester' =>
    Semester::getActual()->id]);
            }]);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getDisSessions()
    => 'id'];//->inverseOf('dis');
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getPractice()
    {
        return $this->hasOne(DisPractice::className(), ['id' =>
    'id_practice']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getDebtKms()
    {
        return $this->hasMany(DebtKm::className(), ['id_dis' =>
    'id']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getParentDis()
    {
        return $this->hasOne(Dis::className(), ['id' =>
    'id_dis']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getChildrenDises()
    {
        return $this->hasMany(Dis::className(), ['id_dis' =>
    'id']);
    }

```

```

    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getFormControl()
    {
        return $this->hasOne(DisFormControl::className(), ['id'
=> 'id_form_control']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getScience()
    {
        return $this->hasOne(Science::className(), ['id' =>
'id_science']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getDisInfos()
    {
        return $this->hasMany(DisInfo::className(), ['id_dis' =>
'id']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getLinkIrDis()
    {
        return $this->hasMany(LinkIrDis::className(), ['id_dis'
=> 'id']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getCompetencies()
    {
        return $this->hasMany(Competence::className(), ['id' =>
'competence_id']->viaTable('competence_discipline',
['discipline_id' => 'id']);
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getInheritedCompetencies()

```

```

    {
        return $this->hasMany(Competence::class, ['id' =>
'competence_id']->viaTable('competence_discipline',
['discipline_id' => 'id_dis']));
    }

    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getLinkTutorDis()
    {
        return $this->hasMany(LinkTutorDis::className(),
['id_dis' => 'id']);
    }
    /**
     * @return \yii\db\ActiveQuery
     */
    public function getPortLinkProjectDises()
    {
        return $this->hasMany(portLinkProjectDis::className(),
['id_dis' => 'id']);
    }

    /**
     * Возвращает сокращенное название карточки (в виде шифра),
    составленное
     * из первых букв каждого слова названия карточки.
     *
     * @return string
     */
    public function getShortName()
    {
        return join('', array_map(function($word) {
            if(mb_strtolower($word) == 'и')
                return 'и';

            return StringHelper::mb_ucfirst(mb_substr($word, 0,
1));
        }, preg_split("/(\s|-)/u", $this->name, -1,
PREG_SPLIT_NO_EMPTY)));
    }

    /**
     * Если удаляет DisInfo, то отчищает временное свойство
    _indexedDisInfos
     * @param string $name
     */
    public function __unset($name){
        switch($name){
            case 'DisInfo':$this->_indexedDisInfos=null;break;
        }
    }

```

```

        parent::__unset($name);
    }

    public static function findDolgOnKafByUser($debt_closed=0,
    $login=null) {
        return
    static::findDolgOnKaf(\Yii::$app->user->role->kaf_id,
    $debt_closed)
        ->andHasTeacherAccess($login);
    }

    /**
     * @param int $kaf ID кафедры
     * @param int $debt_closed искать ли закрытые долги. по
    умолчанию ищет открытые
     * @return DisciplineQuery
     */
    public static function findDolgOnKaf($kaf,$debt_closed=0) {
        return static::find()
            ->distinct()
            ->andWhereKaf($kaf)
            ->andWhereDolg($debt_closed);
    }

    /** @var null|false|DisciplineChoiceBlock */
    private $_choiceBlock;

    public function getChoiceBlock(): ?DisciplineChoiceBlock
    {
        if($this->_choiceBlock === null)
            $this->_choiceBlock =
    DisciplineChoiceBlock::for($this) ?: false;

        return $this->_choiceBlock ?: null;
    }

    public function setChoiceBlock(?DisciplineChoiceBlock
    $choiceBlock): void
    {
        $this->_choiceBlock = $choiceBlock;
    }

    /** @var null|false|DisciplineChoice */
    private $_choice;

    public function getChoice(): ?DisciplineChoice
    {
        // TODO: Переименовать в choices

        if($this->_choice === null)
            $this->_choice = new DisciplineChoice($this) ?:
    false;

```

```

        return $this->_choice ?: null;
    }

    public function getIsChoosable(): bool {
        return $this->choiceBlock !== null;
    }

    public function getIsChosen()
    {
        return !$this->isChoosable || $this->choice->group();
    }

    public function isStartedByStud($id_stud){
        $disInfo = $this->getDisInfoByStudent($id_stud);
        return $disInfo !== null
        && !in_array($disInfo->id_status, [DisInfoStatus::NOT_STARTED]);
    }

    public function getDisInfoByStudent($id_stud){
        if(is_null($this->_indexedDisInfos))
            $this->_indexedDisInfos =
ArrayHelper::index($this->disInfos, 'id_stud');

        return
isset($this->_indexedDisInfos[$id_stud])?$this->_indexedDisInfos
[$id_stud]:null;
    }

    /**
     * Получить максимальную сумму до ВСЕ долговые KM
     * @return float
     */
    public function getDolgKmSum() {
        $sum=0;
        foreach ($this->debtKms as $km){
            FloatSum::add($sum,$km->max_ball);
        }
        return $sum;
    }

    /**
     * Получить максимальную возможную сумму баллов
     * @param integer $id_stud ID студента
     * @return float
     */
    public function getDolgKmSumByStudent($id_stud) {
        $sum = 0;
        foreach ($this->debtKms as $km){
            $isset=false;
            foreach ($km->debtBalls as $ball){
                if($ball->id_stud==$id_stud){

```

```

        $isset=true;
        break;
    }
}
if($isset){
    FloatSum::add($sum,$km->max_ball);
}
}
return $sum;
}

public function getDolgBallByStudent($id_stud) {
    $sum = 0;
    foreach ($this->debtKms as $km){
        foreach ($km->debtBalls as $ball){
            if($ball->id_stud==$id_stud){
                FloatSum::add($sum,$ball->getCorrectBall());
                break;
            }
        }
    }
    return $sum;
}

public function getItogBallByStudent($id_stud)
{
    foreach ($this->debtKms as $km) {
        if ($km->is_itog) {
            foreach ($km->debtBalls as $ball) {
                if ($ball->id_stud == $id_stud) {
                    return $ball->ball;
                }
            }
        }
    }
}

/**
 * Проверить наличие пропущенных долговых КМ
 * @param string $id_stud ID студента
 * @return float
 */
public function hasMissingDolgBallByStudent($id_stud) {
    foreach ($this->debtKms as $km)
        foreach ($km->debtBalls as $ball)
            if($ball->id_stud == $id_stud && $ball->ball ==
-1)
                return true;

    return false;
}

```

```

public function getCurrentSemester(){
    $actualSemester=Semester::getActual();
    $currentSemester=null;
    foreach ($this->segments as $disSegment){ //Для всех
сегментов смотрим - если один из них в текущем семестре, то
возвращаем текущий семестр

if($disSegment->upSegment->id_semester==$actualSemester->id){
    return $actualSemester;
    }
}

    $endSegment=end($this->segments); //Берем последний
семестр, чтобы понять - если он до текущего семестра, то
возвращает семестр последнего сегмента

if($endSegment->upSegment->semester->year<$actualSemester->year)
{
    return $endSegment->upSegment->semester;
}elseif($endSegment->upSegment->semester->year>=$actualS
emester->year){
    if($endSegment->upSegment->semester->sem==2) return
$endSegment->upSegment->semester;
}
    throw new UserException("Карточка состояний из будущего
семестра!");
}

/**
 * Проверит назначен ли пользователь() на состояние
 * @param int $id_group ID группы
 * @param string $login логин пользователя. Если не передан
возьмет текущего
 * @return bool
 */
public function checkUserAccess($id_group,$login=null){
    if($login !== null)
        throw new NotSupportedException('Not implemented');
// TODO

    // TODO: Реализовать как permission

    $user = \Yii::$app->user;
    $login = $user->id;

    if($user->is('ooup')) return true;

    if($user->role->kaf_id != $this->science->id_kaf) return
false;

    if($user->is('methodist')) return true;
    if(!$user->is('teacher')) return false;

```

```

// Найдем идентификаторы всех родительских состояний
$dis_ids = [$this->id];
if($this->id_dis)
    $dis_ids[] = $this->id_dis;

return
LinkTutorDis::find()->where(['login'=>$login,'id_group'=>$id_group,
'id_dis'=>$dis_ids])->exists();
}

public function isOffsetByStud($id_stud) {
    foreach($this->disInfos as $disInfo){
        if($disInfo->id_stud!=$id_stud) continue;
        if(DisInfoStatus::isOFFSET($disInfo->id_status)){
            return $disInfo->id_status;
        }else{
            return false;
        }
    }
    return false;
}

public function getLinkTutorDisByGroup($id_group) {
    /** @var LinkTutorDis[] $groupPreps */
    $groupPreps = []; //Преподаватели, прикрепленные к
группе
    foreach ($this->linkTutorDis as $_link){
        if($_link->id_group==$id_group){
            $groupPreps[]=$_link;
        }
    }
    return $groupPreps;
}

public function getPrepsByStudent($student) {
    $groupPreps=$this->getLinkTutorDisByGroup($student->id_group);

    if(empty($groupPreps)){
        return [];
    }else{
        /** @var LinkTutorDis[] $studentPreps */
        $studentPreps=[];
        foreach ($groupPreps as $groupPrep){
            if(empty($groupPrep->disInfos)){
                $studentPreps[]=$groupPrep;
            }else{
                if($groupPrep->isTeachForStud($student->id))
                    $studentPreps[]=$groupPrep;
            }
        }

        $preps = [];

```

```

        foreach ($studentPreps as $studentPrep){
            try{
                $preps[]=[
                    'login'=>$studentPrep->login,

'name'=>Yii::$app->userNameProvider->name($studentPrep->login)->
fullName(),
                    'email'=>UserProfile::findOne(['user_id'
=> $studentPrep->login])->email,
                ];
            }catch (ErrorException $e){
                echo 1; //fixme
            }

        }
        return $preps;
    }
}

public function getStatus($student_id): ?int
{
    $disInfo = $this->getDisInfoByStudent($student_id);

    return $disInfo === null ? null : $disInfo->id_status;
}

public function setStatus($student_id, $status): bool
{
    $disInfo = $this->getDisInfoByStudent($student_id) ?:
new DisInfo([
        'id_dis' => $this->id,
        'id_stud' => $student_id
    ]);

    $disInfo->id_status = $status;

    return $disInfo->save();
}

public function setDebt($id_stud, $grade) {
    $dis_info = $this->getDisInfos()->andWhere(['id_stud' =>
$id_stud])->one();

    if(!$dis_info && in_array($grade, [1, 3, 4, 5]))
        return true;
    elseif(!$dis_info && in_array($grade, [0, 2])) {
        $dis_info = new DisInfo([
            'id_dis' => $this->id,
            'id_stud' => $id_stud,
            'id_status' => 7,
            'debt' => 1
        ]);
    }
}

```

```

        return $dis_info->save();
    }

    $dis_info->debt = in_array($grade, [0, 2]) ? 1 : 0;
    return $dis_info->save();
}

public function addOffset($id_stud, $offset) {
    if($this->isChoosable
    && !$this->choice->student($id_stud))
        return false;

    $status_id = DisInfoStatus::NOT_STARTED;
    if($offset){
        $status =
DisInfoStatus::findOne(['value'=>$offset]);
        if($status){
            $status_id = $status->id;
        }
    }
    return $this->setStatus($id_stud,$status_id);
}

public function canSetOffset($id_stud){
    return (!$this->isChoosable ||
    $this->choice->student($id_stud)
    and !$this->hasStudentBalls($id_stud)
    and !$this->hasStudentDebt($id_stud));
}

public function hasStudentBalls($id_stud){
    $balls =
Ball::find()->joinWith(['km.disSegment'=>function(ActiveQuery
$query){
        $query->andWhere(['dis_segment.id_dis'=>$this->id]);
    }])->andWhere(['id_stud'=>$id_stud])->andWhere(['>',
'ball', 0])->all();
    return !empty($balls);
}

public function hasStudentDebt($id_stud){
    /** @var DisInfo $dis_info */
    $dis_info = $this->getDisInfoByStudent($id_stud);
    return $dis_info ? $dis_info->debt === 1 : false;
}

public function getRpd($type) {
    foreach ($this->linkIrDis as $linkIrDis){
        if($linkIrDis->ir->id_type==$type &&
$linkIrDis->ir->id_science==$this->science->id){

```

```

        return $linkIrDis->ir;
    }
}
return false;
}

public function getChangeLists() {
    $arr = [];
    foreach ($this->linkIrDis as $linkIrDis){
        if($linkIrDis->ir->id_type==83 &&
$linkIrDis->ir->id_science==$this->science->id){
            $arr[]=$linkIrDis->ir;
        }
    }
    return $arr;
}

public function isTeachForStud($student,$prep_login=null) {
    if(is_null($prep_login))
$prep_login=Yii::$app->user->id;

    foreach ($this->getPrepsByStudent($student) as $prep){
        if($prep['login']==$prep_login) return true;
    }
    return false;
}

public function getDisSessionByGroup($id_group) {
    foreach ($this->disSessions as $disSession){
        if ($disSession->id_group==$id_group){
            return $disSession;
        }
    }
    return null;
}

public function getDisSessionByStud($id_stud) {
    foreach ($this->disSessions as $disSession){
        if ($disSession->id_stud==$id_stud){
            return $disSession;
        }
    }
    return null;
}

public function closeSheet(Group $group, $dop = false,
$semester_id = null, $sheetDate = [])
{
    $semester_id = $semester_id ??
Semester::getActual()->id;
    //$semester_id = 21;

```

```

        $segments = array_filter($this->segments,
function(DisciplineSegment $segment) use($semester_id, $group) {

return !empty($segment->upSegment->up->getGroupsByType($group->i
d))
        && $segment->upSegment->id_semester ===
$semester_id;
    });

    if(empty($segments))
        throw new UserException('Группа не изучает данную
состоянийу');

    foreach($segments as $segment)
        $segment->closeSheet($group, $dop, $sheetDate);
}

    public function closeNp(Student $student, $dop = false,
$sheetDate = [])
    {
//        $segments = array_filter($this->segments,
function(DisciplineSegment $segment) use($student) {
//
return !empty($segment->upSegment->up->getGroupsByType($student-
>id_group));
//        });
        $segments = $this->segments;

        if(empty($segments))
            throw new UserException('');

        if(count($segments) > 1)
            throw new UserException('');

        foreach($segments as $segment)
            $segment->closeNp($student, $dop, $sheetDate);
    }

    public function canCloseSheet(){
// TODO: Реализовать как permission

        $user = \Yii::$app->user;
        $login = $user->id;

        if($user->role->kaf_id != $this->science->id_kaf) return
false;

        if($user->is('methodist')) return true;
        if($user->is('teacher')) {
            /** @var LinkTutorDis $link */
            $link = $this->getLinkTutorDis()->andWhere(['login'
=> $login])->one();

```

```

        if ($link !== null && empty($link->disInfos))
            return true;
    }

    return false;
}

public function getZet() {
    // @TODO: Не перекрывать видимость переменной $zet
    if($this->zeta === null && $this->id_dis !== null){
        $zet = $this->parentDis->zeta;
    }else{
        $zet = $this->zeta;
    }
    return $zet;
}

public function getHour() {
    return $this->getZet()*36;
}

public function hasChangeBallByStud($id_stud, $date) {
    $date=DateTime::createFromFormat('d-m-Y
H:i:s',$date)->format('Y-m-d H:i:s');
    foreach ($this->segments as $segment){
        foreach ($segment->kms as $km){
            $ball = $km->getBallByStudent($id_stud);
            if(is_null($ball)) continue;

if($ball->getBallChanges()->andWhere(['>','datetime',$date])->count()>0){
                return true;
            }
        }
    }
    return false;
}

public function getExamDateForGroup($id_group) {
    $session = $this->getDisSessionByGroup($id_group);

    if($session !== null && $session->date_exam !== null)
        return $session->date_exam;

    return $this->parentDis !== null ?
$this->parentDis->getExamDateForGroup($id_group) : null;
}

/**
 * Получить id экзамена для указанной группы или студента
 * @param int $groupId
 * @return string
 */

```

```

    public function getExamIdForGroup($groupId, $disId, $prevId
= null) {
        /** @var DisSession $session */
        $session = $this->getDisSessionByGroup($groupId);
        if ($session && $session->date_exam) {
            $examId = $session->id;
        } else {
            if($this->segments[0]->upSegment->up->id_type ==
UpType::IUP && !is_null($this->id_dis)){
                $examId =
$this->parentDis->getExamIdForGroup($groupId, $disId,
$this->id);
            } else {
                $examId = $prevId ? $prevId : null;

                // Если для данной карточки не установлена дата
                if(is_null($examId)) {
                    if(!$session->id) {
                        $session = new DisSession();
                        $session->id_dis = $disId;
                        $session->id_group = $groupId;
                        $session->save();
                    }

                    // Возвращаем id нового экзамена
                    $examId = $session->id;
                }
            }
        }

        return $examId;
    }

    public function isExamDateOwner($id_group){
        /** @var DisSession $session */
        $session = $this->getDisSessionByGroup($id_group);
        if($session and $session->date_exam){
            $flag = true;
        }else{
            $flag = false;
        }
        return $flag;
    }

    public function setExamDate($id_group, $examDate) {
        $id_group = intval($id_group);

        if(is_array($examDate) && $examDate["date"] == null &&
$examDate["time"] == null
        && $examDate["room"] == null) return false;

        /** @var DisSession $session */

```

```

$session = $this->getDisSessionByGroup($id_group);
if(!$session){
    $session = new DisSession([
        'id_dis' => $this->id,
        'id_group' => $id_group,
    ]);
}

$session->date_exam = mb_substr(is_array($examDate) ?
$examDate["date"] : $examDate, 0, 10);
if(is_array($examDate) && !is_null($examDate["time"]))
$session->time_exam = mb_substr($examDate["time"], 0, 5);
if(is_array($examDate) && !is_null($examDate["room"]))
$session->room_exam = mb_substr($examDate["room"], 0, 7);
return $session->save();
}

public function setConsultationDate($groupId,
$consultationDate) {
    $groupId = intval($groupId);

    if($consultationDate["date"] == null &&
$consultationDate["time"] == null
    && $consultationDate["room"] == null) return false;

    $link = LinkConsDisGroup::findOne([
        "id_dis" => $this->id,
        "id_group" => $groupId
    ]);

    $consultation = $link ? $link->cons : new
Consultation();
    $consultation->date = $consultationDate["date"];
    $consultation->time = $consultationDate["time"];
    $consultation->room = $consultationDate["room"];
    $consultation->mode = 4;
    $consultation->save();

    if(!$link) {
        $link = new LinkConsDisGroup([
            'id_dis' => $this->id,
            'id_cons' => $consultation->id,
            'id_group' => $groupId,
        ]);
        $link->save();
    }
}

/**
 * Преобразуем дату формата dd-mm-yyyy в dd %month_name%
YYYY

```

```

* @param $date
* @return string
*/
public function transformDate($date) {
    if(is_null($date)) return null;

    list($dd, $mm, $yyyy) = explode('-', $date);
    return implode(' ', [$dd, strlen($mm) == 2 ?
DateHelper::getMonthName($mm) : null, $yyyy]);
}

public function updateKmActivesForSem($semester, $group_ids
= null) {
    if(!is_object($semester))
        $semester = Semester::findOne($semester);

    foreach($this->segments as $segment) {
        if($segment->upSegment->semester->id ==
$semester->id) {
            $up = $segment->upSegment->up;
            $groups = $up->getGroupsByType($group_ids);
            $week = $semester->getWeekByUp($up);

            foreach($segment->kms as $km)
                foreach($groups as $group)
                    $km->updateActive($group->id, $week);
        }
    }
}

public function dropStudentProgress($id_stud){
    $dis_info = $this->getDisInfoByStudent($id_stud);
    if($dis_info and !$dis_info->delete()){
        throw new \Exception("Не удалось удалить dis_info
студента {$id_stud} по состоянию {$this->id}");
    }
    foreach($this->segments as $segment){
        foreach($segment->kms as $km){
            $ball = $km->getBallByStudent($id_stud);
            if($ball and !$ball->delete()){
                throw new \Exception("Не удалось удалить
ball студента {$id_stud} по КМ {$km->id}");
            }
        }
    }
    foreach($this->debtKms as $debtKm){
        foreach($debtKm->debtBalls as $debtBall){
            if($debtBall->id_stud == $id_stud){
                if(!$debtBall->delete()){
                    throw new \Exception("Не удалось удалить
debtBall студента {$id_stud} по долговому КМ {$debtKm->id}");
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
}

public function compareWithDis(Dis $dis) {
    if($dis->id_science!=$this->id_science) return false;
    if($dis->name!=$this->name) return false;
    if($dis->id_form_control!=$this->id_form_control) return
false;
    if($dis->zet!=$this->zet) return false;
    if($dis->plan_srs!=$this->plan_srs) return false;
    if($dis->plan_lab!=$this->plan_lab) return false;
    if($dis->plan_lecture!=$this->plan_lecture) return
false;
    if($dis->plan_seminar!=$this->plan_seminar) return
false;

    $isVdv = function(Dis $discipline) {
        return $discipline->isChoosable
            && $discipline->choiceBlock->type !==
DisciplineChoice::CHOICE_WHOLE;
    };

    if(!$isVdv($dis) || !$isVdv($this)){
        if($dis->sh!=$this->sh) return false;
    }
    return true;
}

public function isTeachedForGroupBy($group_id, User $user =
null)
{
    $user = $user ?? \Yii::$app->user->identity;

    if(($kaf_id = $this->science->id_kaf) === null)
        throw new \UnexpectedValueException('Не задана
кафедра для карточки');

    if(!$user->can("teacher_{$kaf_id}"))
        return false;

    foreach($this->linkTutorDis as $link)
        if($link->id_group == $group_id && $user->id ==
$link->login)
            return true;

    return false;
}

public function isTeachedForStudentBy(Student $student, User
$user = null)

```

```

{
    $user = $user ?? \Yii::$app->user->identity;

    if(($kaf_id = $this->science->id_kaf) === null)
        throw new \UnexpectedValueException('Не задана
кафедра для карточки');

    if($user->can("methodist_{$kaf_id}") ||
$user->can("zav_{$kaf_id}"))
        return true;

    if(!$user->can("teacher_{$kaf_id}"))
        return false;

    // Найдем все связи с данным преподавателем
    $link = Util::array_where($this->linkTutorDis, [
        'login' => $user->id, 'id_group' =>
$student->id_group
    ]);
    $link = !empty($link) ? current($link) : null;

    if(!empty($this->segments) && ($sup =
$this->segments[0]->upSegment->up)->id_type == UpType::IUP) {
        if($sup->student->id != $student->id)
            return false;

        if($link !== null)
            return true;

        if($this->parentDis !== null &&
$this->parentDis->isTeachedForStudentBy($student, $user))
            return true;

        return false;
    }

    if($link === null)
        return false;

    return empty($link->disInfos) ||
$link->isTeachForStud($student->id);
}

/**
 * @deprecated У карточки может быть несколько сегментов (в
т.ч. нуль). Вместо DisSegment используйте
Segment/DisciplineSegment.
 */
public function getFirstDisSegment() {
    throw new NotSupportedException();
}

```

```

/**
 * @deprecated У карточки может быть несколько сегментов (в
т.ч. ноль)
 */
public function getFirstSegment() {
    return $this->segments[0];
}

public function upType() {
    return (count($this->segments) === 1 &&
$this->getFirstSegment()->upSegment->up->id_type ==
UpType::IUP) ? UpType::IUP : UpType::RUP;
}

/** Получить массив сех групп карточки
 * @return string[] || bool
 */

public function getGroupNames(){
    $names = [];

    if (!$this->linkTutorDis) return false;
    foreach ($this->linkTutorDis as $link){
        $names[$link->group->id] =
$link->group->getShortName();
    }
    return $names;
}

public function countActiveStudents($group_id)
{
    return array_sum(array_map(
        fn(DisciplineSegment $s) =>
count($s->upSegment->up->getActiveStudentsByType($group_id)),
        $this->segments
    ));
}
}

```