

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в институте Системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ»

Научный консультант: **Гагарина Лариса Геннадьевна**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Карпенко Анатолий Павлович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
САПР МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Синицин Владимир Игоревич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, руководитель Отдела №62,  
главный научный сотрудник ФИЦ ИУ  
РАН

**Ромашкова Оксана Владимировна**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Системного анализа и информатики Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Смоленский государственный университет»**

Защита состоится «24» декабря 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, д.92 (9-101)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте: <https://tsu.tula.ru/>

Автореферат разослан «01» октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Маслова  
Анна Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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.

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.

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

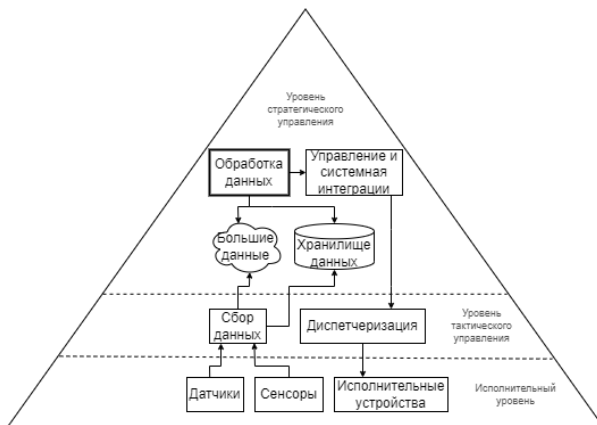


Рис.1. Обобщенная схема ИИУС предприятия

По данным Центра компетенций по импортозамещению в сфере информационно-коммуникационных технологий объем ИИУС для МНЭ, 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. 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%. Однако, для повышения эффективности

использования методов нелинейной динамики требуются дополнительные исследования по обработке взаимозависимых нелинейных данных. 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. Таким образом, нелинейность перечисленных составляющих становится критическим параметром, особенно с учетом человеческого фактора. Более того, нелинейные зависимости между параметрами процессов, их большое количество, а также внешние воздействия могут привести к потере устойчивости ИИУС и ухудшению качества управления производством.

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 и др.

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 общих, так и 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 нанoeлектроники.

*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 использовались 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, а именно 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, визуализацию 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 современных 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 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 динамику 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.

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 управляемость ИИУС, 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» в рамках опытной эксплуатации.

Предложенные в работе модели и алгоритмы используются в учебном процессе института СПИНТех НИУ МИЭТ, НОЧУ ВО МУППИ.

#### 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 Development 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 принимал 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 работах, из них 39 статей в рецензируемых журналах, в том числе индексируемых в Scopus, монографий – 4, результатов интеллектуальной деятельности – 16; конференции различного уровня и межвузовские сборники – 40.

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

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ проанализирована проблемная ситуация, выявлены ее причины, обоснована актуальность диссертационной работы; сформулированы цель и задачи исследования; приведены положения, выносимые на защиту; показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ представлен аналитический обзор существующих методов, моделей и средств обработки информации в современных ИИУС. Типовой ИИУС свойственны открытость, диссипативность, неустойчивость, нелинейность, поскольку ее состояние зависит от совокупности внешних факторов в различные моменты времени и определяется системой дифференциальных уравнений. В связи с этим 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 с известными начальными условиями, которые определяются на основе сочетания компонентных и топологических уравнений отдельных элементов процесса, вид которых задается связями между элементами, что весьма затруднительно, особенно, для сложных процессов.

2) Зависимости и коэффициенты в дифференциальных уравнениях определяются постановкой задачи и заданной точностью модели, более того, вычисляются эмпирически, что является нетривиальной задачей и требует дополнительных исследований.

3) Для решения уравнений используется конструктивный подход с элементами численных методов, сплайны, аппроксимация, что приводит к увеличению погрешности модели.

4) Определение особых точек и их типов в моделях позволяет получать параметры возникновения устойчивых/неустойчивых состояний системы, но не их математическое описание.

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

6) Отсутствие аналитического решения в большинстве моделей не позволяет моделировать и исследовать неустойчивое состояние системы.

Следовательно, для достижения цели исследований необходима разработка модели ИИУС, лишенной перечисленных недостатков, 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 модели, которые также не учитывают нелинейные факторы внутреннего контура современных ИИУС и внешних воздействий на них.

Таким образом, на основании вышесказанного сделан вывод о необ-

ходимости развития теории построения современных ИИУС за счет создания моделей, алгоритмов и методологии повышения управляемости системы, базирующейся на применении нелинейной динамики.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ разработана концептуальная модель ИИУС, в которой иерархически построенные компоненты ИИУС представлены как объекты управления с определенными граничными условиями.

Основу модели составляет иерархическая структура (ИрхС) ИИУС в виде И-, ИЛИ- или И-ИЛИ-дерева. Количество уровней и вершин ИрхС ИИУС не более, чем счетно. Введем ряд определений. *Событие* – это выполнение условия добавления компонента в ИрхС. *Обработчик события* – блок команд, выполняемых при наступлении события. *Правильный обработчик* – обработчик, работа которого заканчивается за конечное число шагов (далее рассматриваем только правильные обработчики).

Обработка событий при формировании ИрхС организована с помощью очереди  $Q = \{q_1, \dots, q_n\}$ . При  $i < j$  событие  $q_i$  обрабатывается раньше события  $q_j$ ;  $Q_t$  – 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, новые помещаются в конец очереди. Исполнение одного блока команд приводит к помещению в очередь конечного числа событий. В очередь не попадают одинаковые события. Следовательно, для обработки ИрхС ИИУС существует не более чем конечное и счетное множество  $E$  всех событий  $e$ :

$$E = \{e_i\}_i^N. \quad (1)$$

Пусть  $Q_0 = \{q\}$ , тогда  $M_1q$  – события, порождаемые обработкой события  $q$ . 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:

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

$k$  – порядковый номер события в последовательности.

Если в  $Q_0$  больше одного элемента, то справедливо равенство

$$M_{n+1}Q_0 = Y_{e_k \in M_nQ_0}^{M_nQ_0} M_1e_k, \quad M_1Q_0 = Y_{e_k \in Q_0}^{Q_0} M_1e_k, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Обработка событий заканчивается тогда, когда заканчиваются события в очереди  $\exists N: M_NQ_0 = \emptyset$ . С учетом выражения

$$\forall t \forall e \in Q_t \forall Ne \notin M_Ne \quad (4)$$

в очередь не попадают события, порождающие сами себя, что позволяет избежать закливания очереди.

Рассмотрим ИИУС в виде абстрактного дерева. Уровень  $i$  ( $L_i$ ) – это все вершины дерева, построенные на  $i$ -ом шаге обработки событий. Всего уровней  $n$ , где  $n$  – число шагов обработки событий.

Шаг 0. Выбор события  $q$ , которое станет корнем дерева  $L_0 = \{q\}$ .

Шаг  $i$ . Для каждой вершины дерева  $s \in L_{n-1}$ :  $M_1s \neq \emptyset$  добавить элементы последовательности  $M_1s$ . При  $M_1s = \emptyset$  дерево построено.

С учетом (4) в дереве не более  $|E|$  уровней и для любой вершины  $k$  уровня существует не более  $|E| - k$  подвершин. Следовательно, в каждом уровне содержится не более чем

$$p_k = \frac{(E-1)!}{(E-k)!}, \quad k = \overline{1, |E|} \quad (5)$$

элементов, а все дерево состоит не более чем из

$$V = \sum_{k=1}^E p_k = \sum_{k=1}^E \frac{(E-1)!}{(E-k)!} \quad (6)$$

вершин. Построенное таким образом дерево соответствует очереди и обрабатывается не более, чем за  $V$  шагов.

При разработке концептуальной модели типовой ИИУС используется референтная модель, причем применяются следующие допущения.

1. Представление ИИУС в виде модели входо-выходов и разделение входных потоков на изменяемые, изменяющие и управляющие (рис.2).



Рис.2. Функциональная модель ИИУС

2. Классификация компонентов по их выходным потокам на основные (решение задач и достижение цели ИИУС), обеспечивающие (обеспечение ресурсами другие компоненты), управляющие (планирование и управление другими компонентами) и развивающие (изменение, оптимизация и повышение эффективности работы компонентов).

3. Последовательное разделение компонентов по результатам их работы и назначению.

На основе вышеприведенных допущений получена основанная на принципах иерархичности **концептуальная модель** сложной ИИУС (рис.3). Разработанная модель позволяет учитывать связи между компонентами, их взаимозамещение, определять управляющие воздействия.

С учетом и на основании вышесказанного разработана **обобщенная математическая модель ИИУС**

$$S = \langle E_1, \dots, E_n, O_{s1}, \dots, O_{sm}, R_{s1}, \dots, R_{sk} \rangle, \quad (7)$$

где  $S$  - математическое представление ИИУС;  $E_i$  - алгебраическая система, представляющая объект ИИУС;  $O_{si}$  - функции ИИУС, зависящие от функций объектов, входящих в ее состав;  $R_{si}$  - отношения между объектами ИИУС, зависящие от отношений, определенных внутри объекта.

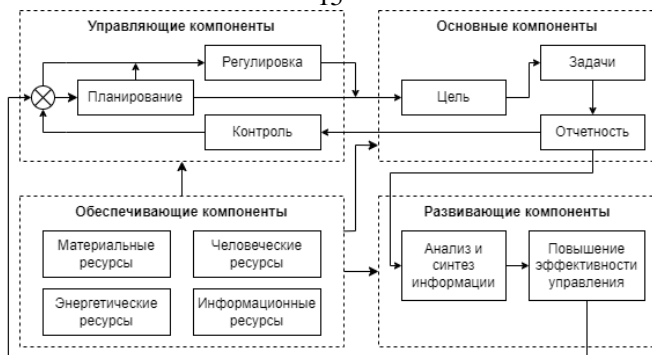


Рис.3. Концептуальная модель ИИСУ

Тогда математическое представление объекта ИИСУ  $E$  имеет вид:

$$E = \langle A_1, \dots, A_n, V_1, \dots, V_n, O_1, \dots, O_m, R_1, \dots, R_k \rangle, \quad (8)$$

где  $A_i = \{a_{i1}, \dots, a_{ir}\}$  – характеристики объекта. Характеристики делятся на основные  $A_G^E$ , обеспечивающие  $A_R^E$ , управляющие  $A_M^E$  и развивающие  $A_U^E$ ;  $V_i = \{v_{i1}, \dots, v_{ir}\}$  – значения характеристик;  $O_i = \{(\text{название}), (\text{входные параметры}), (\text{выходные параметры})\}$  – функции объекта;  $R_i = \{r_{i1}, \dots, r_{ik}\}$  – отношения между элементами объекта. Отношение является декартовым произведением двух множеств и представляет упорядоченную пару  $r_{ij} = (a_{ij}, v_{ij})$ . Отношения между характеристиками, операциями определяются в процессе моделирования объекта.

Состояние объекта определяется значениями характеристик

$$E_S = \langle (a_{1i}, v_{1i}), \dots, (a_{ni}, v_{ni}) \rangle, \quad (9)$$

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

Наличие связей позволяет распределить характеристики по группам или уровням (иерархическая структура представления объекта). Следовательно, количество элементов представления объекта не более, чем счетно, а это означает, что представленные соотношения позволяют моделировать ИИСУ любой сложности с требуемой точностью.

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

- 1)  $\forall c_i \in C \exists D_i \subset D: \forall d \in D_i \rightarrow (c_i, d) \in R \equiv c_i R d \wedge |D_i| \geq 1$ ;
- 2)  $\forall c \in C \exists! d \in D: c R d$ .

Состояние ИИСУ определяется совокупностью состояний входящих в ее состав объектов:

$$S_S = \langle E_{1S}, \dots, E_{nS} \rangle, \quad (10)$$

где  $E_{iS}$  – состояния объекта из состава ИИСУ. Такое представление состояние ИИСУ 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:

$$N^E = \langle A_1^E, \dots, A_n^E, V_1^E, \dots, V_n^E, O_1^E, \dots, O_m^E, R_1^E, \dots, R_k^E \rangle, \quad (11)$$

где  $A_i^E$  – характеристики компонента,  $A_i^E \subseteq A_i$ ;  $V_i^E$  – значения характеристик,  $V_i^E \subseteq V_i$ ;  $O_i^E$  – функции компонента,  $O_i^E \subseteq O_i$ ;  $R_i^E$  – отношения между элементами значимого компонента,  $R_i^E \subseteq R_i$ .

Алгебраические системы значимых компонентов одной ИИУС подобны и  $h: N_1^E \rightarrow N_2^E$  – гомоморфизм, что подтверждает взаимозаменяемость компонентов одного иерархического уровня и функционального назначения. Поскольку для  $\forall o_{ij}^E \in O_i^E$  и  $\forall a_{ij}^E \in A_i^E$  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  $n \geq 1$ . Кроме того, выполняется условие сохранения отношений для  $A_i^E$  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  $n \geq 1$ . Следовательно,  $h: N_1^E \rightarrow N_2^E$  – гомоморфизм.

Состояние значимого компонента представляет совокупность  $N_S^E$  значений ее характеристик в определенный момент времени:

$$N_S^E = \langle (a_{ij}^E, v_{ij}^E), \dots, (a_{ni}^E, v_{ni}^E) \rangle, \quad (12)$$

где  $(a_{ij}^E, v_{ij}^E)$  – упорядоченная пара характеристики компонента и ее значение,  $N_S^E \subset N^E$  т.к.  $(a_{ij}^E, v_{ij}^E) \in N^E$ . Поскольку состояние компонента в бесконечно малый момент времени определено и статично, то любой компонент в бесконечно малый момент времени является статичным.

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.

$$P^S = \langle N_1^E, \dots, N_n^E, O_{s1}^S, \dots, O_{sm}^S, R_{s1}^S, \dots, R_{sk}^S \rangle, \quad (13)$$

где  $N_i^E$  – значимый компонент ИИУС;  $O_{si}^S$  – функции ИИУС,  $O_{si}^S \subseteq O_{si}$ ;  $R_{si}^S$  – отношения между значимыми компонентами,  $R_{si}^S \subseteq R_{si}$ .

Если  $h: N_1^E \rightarrow N_2^E$  и  $g: P_1^S \rightarrow P_2^S$  – гомоморфизмы, то и  $h \circ g: N_1^E \rightarrow P_2^S$  – гомоморфизм. Известно, что получаемое при композиции отображение сопоставляет любому элементу  $N_1^E$  элемент  $h(g(N_1^E))$ . Следовательно для  $\forall o_{ij}^E \in O_i^E$  и  $\forall a_{ij}^E \in A_i^E$  выполняется условие сохранения функции  $h(g(a_{i1}^E \dots a_{in}^E o_{ij}^E)) = h(g(a_{i1}^E) \dots h(g(a_{in}^E) o_{ij}^E))$  при  $n \geq 1$ . Анало-



гично,  $g(a_{i1}^E \dots a_{in}^E o_{ij}^E) = g(a_{i1}^E) \dots g(a_{in}^E) o_{ij}^E$  при  $n \geq 1$ . Кроме того, выполняется условие сохранения отношений для  $A_i^E$  и  $V_i^E$ , то их образы  $h(g(a_1^E, v_1^E)), \dots, h(g(a_n^E, v_n^E))$  при гомоморфизме  $h$  во второй системе связаны тем же отношением  $h(g(a_i^E, v_i^E)) \in R_i^E$  при  $n \geq 1$ . Аналогично,  $g(a_1^E, v_1^E), \dots, g(a_n^E, v_n^E)$  связаны тем же отношением  $g(a_i^E, v_i^E) \in R_i^E$  при  $n \geq 1$ . Следовательно,  $h \circ g: N_1^E \rightarrow P_2^S$  – гомоморфизм. Таким образом, ИИУС, разработанная для одного процесса может быть использована для другого подобного процесса как полностью, так и покомпонентно.

Разработанные математические представления ИИУС и их свойства подтверждают сделанные ранее допущения о иерархическом соподчинении в ИИУС, о связях между отдельными компонентами и их взаимозаменяемости, а также утверждение о том, что состояние ИИУС определяется состоянием значимых компонентов. Представленная выше обобщенная математическая модель ИИУС позволяет определять не только состояние системы в любой момент времени, но и ее поведение.

На основе предложенной модели ИИУС разработан **алгоритм управления устойчивостью ИИУС** (рис.4). Известно, что неустойчивое аperiодическое поведение системы хорошо изучено и адекватно описано с помощью формального аппарата теории устойчивости. Тогда, если в какой-то момент времени  $t$  ИИУС под воздействием внешних факторов переходит в состояние неустойчивое, то целесообразно управлять его развитием до определенного значения, затем стабилизировать и перевести ИИУС в устойчивое состояние.

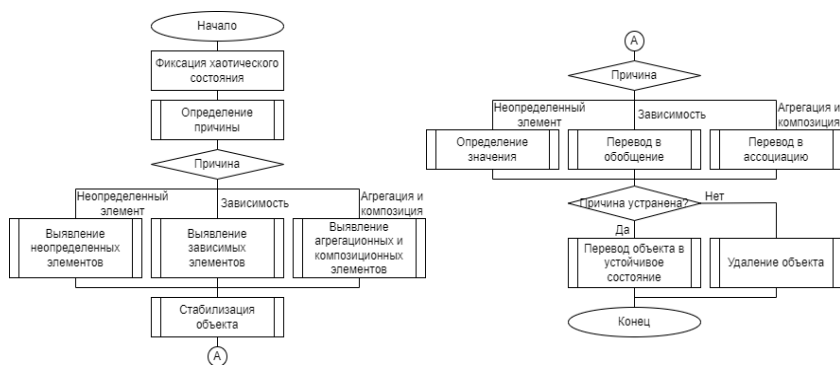


Рис.4. Схема алгоритма управления устойчивостью ИИУС

Рассмотрим подробнее последовательность действий алгоритма.

1) Фиксация хаотического состояния. При неустойчивом состоянии ИИУС невозможен переход в определенное состояние:

$$O_i^E: N_i^E \nrightarrow N_{(i+1)S}^E; O_{si}^S: P_{iS}^S \nrightarrow P_{(i+1)S}^S. \quad (14)$$

2) Определение причины неустойчивого состояния. Состояние значимого компонента системы является первичным в развитии неустойчивости ИИУС:

$$O_i^E: a_{ij}^E R_j^E v_{ij}^E \nrightarrow (a_{ij}^E, v_{ij}^E). \quad (15)$$

Исходя из обобщенной математической модели ИИУС, поиск причин неустойчивости заключается в выявлении неопределенных компонентов, зависимости, агрегации или композиции.

3) Стабилизация компонента ИИУС заключается в выявлении и отмене функций, использующих в качестве входных/выходных параметров неопределенные значения характеристик. Это временная мера, предназначенная для накопления обеспечивающих характеристик, необходимых для продолжения развития и перевода ИИУС в состояние устойчивое. Стабилизация производится компонентом, находящемся на более высоком иерархическом уровне. В процессе стабилизации возможно создание новых элементов ИИУС с целью замены зависимых, удаление неисправных элементов для сохранения жизнеспособности системы.

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

- При неопределенности значения характеристики  $v_{ij}^E \notin V_i^E \subseteq V_i$  следует определить значение или ограничивающие условия.

- Отношение зависимости  $R: V_i^E \cup V_j^E | V_j^E \rightarrow \emptyset$  при  $V_i^E \rightarrow \emptyset$  перевести в отношение обобщения  $R: V_j^E \rightarrow V_i^E \cup V_j^E, V_i^E \rightarrow V_i^E$  путем разделения объединенного множества  $V_i^E \cup V_j^E$  на самостоятельные. Возможно добавление характеристик и их значений в формируемые множества.

- Агрегацию (композицию) перевести в ассоциацию с выделением собственных значений для пересекающихся характеристик объектов.

5) Если удалось устранить причины неустойчивости, то ИИУС переходит в устойчивое состояние с формированием новых состояний. В противном случае – необходимо удалить нестабильный элемент ИИУС.

Для устойчивого состояния ИИУС требуется устойчивое состояние всех ее элементов. При удалении нестабильного элемента необходимо определить его состояние и оценить возможность восстановления. Восстановление элемента заключается в следующем:

1) сравнение элемента с абстрактной моделью с целью выявления недостающих характеристик  $E \setminus N^E, S \setminus P^S$ ;

2) выделение элементов различных типов. Обеспечивающие элементы подлежат восстановлению в первую очередь, затем управляющие и основные; развивающие элементы восстанавливаются последними;

3) восстановление недостающих элементов из абстрактной модели; выполнение функций, в которых элементы являются выходными параметрами, а затем – входными;

4) в случае невозможности активации элементов необходимо создать

зависимости, агрегации или композиции между ними. Затем отношения после активации переводятся в обобщение и ассоциацию.

5) при отсутствии самостоятельного функционирования элемента следует создать зависимости, агрегации с другим элементом.

6) при отсутствии положительной динамики восстановления необходимо его прекратить.

В результате устранения причины возникновения неустойчивости формируется пара  $(a_{ij}^E, v_{ij}^E)$ , т.е. создается новое состояние ИИУС.

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.

Альтернативным способом повышения управляемости и устойчивости ИИУС является мониторинг состояний объектов ИИУС с использованием разработанной обобщенной математической модели, который позволит определять неустойчивость объектов и своевременно изменять состояние на устойчивое.

**В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ** разработана **модель граничных состояний ИИУС, условий их наступления и динамики изменения состояния системы при внешнем управляющем воздействии.**

Для разработки модели устойчивости представим ИИУС в виде модели рычага I типа (рис.5). Точка опоры свободно перемещается вдоль рычага и находится между двумя закрепленными с одной стороны пружинами жесткости  $k$ . К точке А прикладывается внешнее воздействие на ИИУС, а в точке В возникает ответная реакция. Точка О – точка опоры. Плечо рычага  $l_A$  – степень реактивности ИИУС, способность реагировать на внешнее воздействие. Плечо  $l_B$  – статичность ИИУС, способность поглощать внешнее воздействие и оставаться в равновесии. Физически реактивность и статичность ИИУС представляется двумя пружинами с жесткостью  $k$ . Ось  $y$  показывает направление действия возникающих в ИИУС реакций. Совпадающее с направлением оси  $y$  действие реакции направлено на изменение внутреннего состояния процесса.

Против оси  $y$  – действие реакции направлено от процесса с целью изменения внешнего воздействия. Вернуть рычаг в состояние

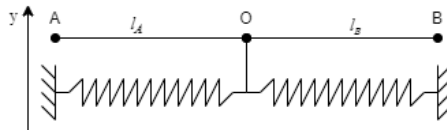


Рис.5. Графическая интерпретация модели состояния ИИУС

равновесия возможно или созданием компенсационного воздействия в точке В, или перемещением точки О. Перемещение точки О в сторону точки А соответствует накоплению энергии в системе, а перемещение в сторону точки В – выделению энергии. Физически процесс накопления энергии – это работа по сжатию пружины реактивности и растяжению

пружины статичности. Процесс выделения энергии – это работа по растяжению пружины реактивности и сжатию пружины статичности. При этом действие силы упругости обеих пружин и в том и в другом случае направлено к точке О, т.е. к возвращению в состояние равновесия. Жесткость  $k$  (ригидность) – воздействие на ИИУС, изменяющее ее внутреннее состояние на единицу измерения состояния. Длина рычага  $l = l_A + l_B$  соответствует устойчивости.

Разработанная выше концептуальная модель ИИУС позволяет рассматривать полученные объекты в бесконечно малый момент времени  $dt$  как замкнутую систему. Следовательно, согласно законам сохранения, на внешнее воздействие  $\vec{F}_A$  в системе сформируется ответная компенсационная реакция  $\vec{F}_B$  (рис.6). В соответствии с условием равновесия рычага:

$$F_A l_A = F_B l_B \text{ или} \\ F_B = \frac{F_A l_A}{l_B} \quad (16)$$

Для  $\vec{F}_A$ , направленной против оси  $y$ , рассуждения аналогичны.

При стремлении к равенству реактивности и статичности ИИУС

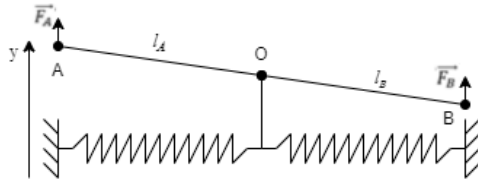


Рис.6. Внешнее воздействие и компенсационная реакция

воздействие и ответная реакция на воздействие равны. Это идеальное равновесное состояние системы: поглощаемая и выделяемая энергия равны,

$$\lim_{l_B \rightarrow l_A} F_B = \lim_{l_B \rightarrow l_A} \frac{F_A l_A}{l_B} = F_A. \quad (17)$$

При  $l_B \rightarrow 0$  ответная реакция ИИУС бесконечно большая даже при малом внешнем воздействии. Для данного состояния характерна высокая энтропия и разрушение системы. Энергия выделяется и рассеивается:

$$\lim_{l_B \rightarrow 0} F_B = \lim_{l_B \rightarrow 0} \frac{F_A l_A}{l_B} = \infty. \quad (18)$$

При  $l_A \rightarrow 0$  на любое внешнее воздействие реакция ИИУС отсутствует, энергия не выделяется. Это состояние неустойчивого равновесия:

$$\lim_{l_A \rightarrow 0} F_B = \lim_{l_A \rightarrow 0} \frac{F_A l_A}{l_B} = 0. \quad (19)$$

При начальном равновесном состоянии ИИУС у пружин отсутствуют деформация, их длина равна  $l_{A0}$  и  $l_{B0}$  соответственно. При перемещении точки О в сторону точки А на  $\Delta l$  в системе накапливается энергия  $E_A = k\Delta l^2$  и выделяется  $E_B = k\Delta l^2$ . При  $\Delta l \rightarrow l_A$  и  $\Delta l \rightarrow l_B$  значение накапливаемой и выделяемой энергии максимальны:

$$E_{Amax} = kl_A^2; E_{Bmax} = kl_B^2. \quad (20)$$

При внешнем воздействии в течение времени  $t$  ИИУС выведена из состояния равновесия. Точка А перемещается по круговой траектории на дугу  $s$ , а рычаг повернется на угол  $\alpha$  (рис.7). При этом совершается работа

$dA$  по перемещению конца рычага. Поскольку  $\vec{F}_A \parallel d\vec{s}$  элементарная путевая работа рассчитывается по формуле:

$$dA = F_A ds; dA = F_A l d\alpha; A = \int_0^\alpha F_A l_A d\alpha = F_A l_A \alpha. \quad (21)$$

При движении тела массой  $m$  под действием силы  $\vec{F}_C$  по круговой траектории совершается работа центростремительной силы.

$$F_C = ma_C = \frac{mv^2}{l_A}; v = \frac{ds}{dt}; ds = l_A d\alpha;$$

$$v = \frac{l_A d\alpha}{dt}; v = l_A \omega = l_A \varepsilon t, \quad (22)$$

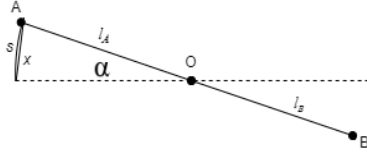


Рис.7. Поворот рычага и перемещение точки А

где  $\varepsilon$  – угловое ускорение,  $\varepsilon = \frac{F_A}{ml_A}$ ; время  $t^2 = \frac{2\alpha}{\varepsilon}$ .

Тогда центростремительная сила равна:

$$F_C = \frac{m(l_A \varepsilon t)^2}{l_A} = 2ml_A \varepsilon \alpha = 2\alpha F_A. \quad (23)$$

Элементарная работа центростремительной силы равна:

$$dA_C = 2F_A l_A \alpha \sin \alpha d\alpha; \quad (24)$$

$$A_C = \int_0^\alpha 2F_A l_A \alpha \sin \alpha d\alpha = 2F_A l_A (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha). \quad (25)$$

Поскольку силы  $F_A$  и  $F_C$  взаимно перпендикулярны, то работы этих двух сил аддитивны:

$$A_A = A + A_C; A_A = F_A l_A \alpha + 2F_A l_A (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha). \quad (26)$$

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

$$A_B = F_B l_B \alpha + 2F_B l_B (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha). \quad (27)$$

Переход к состоянию равновесия начинается после прекращения внешнего воздействия. Определим точку невозврата, при достижении которой система не возвращается в состояние равновесия; происходит переход ИИУС в состояние неустойчивого равновесия или ее разрушение.

При внешнем воздействии на ИИУС происходит работа по изменению внутреннего состояния и 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 О:

$$A_O = A_B = A_A = k \Delta l^2. \quad (28)$$

В соответствии с (20) при  $\Delta l \rightarrow l_A$  система не возвращается к состоянию равновесия. Максимальная работа равна:

$$A_{max} = k l_A^2 = F_A l_A \alpha + 2F_A l_A (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha); \quad (29)$$

$$l_A = \frac{F_A (\alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha))}{k}. \quad (30)$$

Реактивность ИИУС – динамическая величина, зависит от величины внешнего воздействия, степени изменения состояния и ригидности системы. Динамика реактивности  $l_A$  соответствует динамике функции  $f(\alpha) = \alpha + 2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)$  (рис.8). Начало состояния неустойчивого

равновесия соответствует значению 0 реактивности при внешнем воздействии. Если внешнее воздействие продолжается и увеличивается отклонение от равновесия, то реактивность вновь достигает значения 0.

При дальнейшем воздействии реактивность бесконечно возрастает, т.е. ИИУС стремится к состоянию с высокой энтропией в соответствии со вторым законом термодинамики.

Таким образом, разработанная модель граничных состояний ИИУС, условий их наступления, динамики изменения

состояния при внешнем управляющем воздействии позволяет получить вероятностное пространство состояний, необходимое для прогнозирования поведения ИИУС.

Исследование состояний ИИУС показало, что состояния классифицируются как разовое, повторяющееся и циклическое. Возможно изменение характеристик объектов при повторяющемся и циклическом поведении. При реорганизации ИИУС наборы характеристик меняются.

Согласно (13) состояние ИИУС оценивается по совокупности характеристик значимых компонентов. Для этого необходимо рассчитать среднее значение характеристик:

$$\overline{N}_S^E = \langle \overline{A}_R^E, \overline{A}_M^E, \overline{A}_G^E, \overline{A}_U^E \rangle. \quad (31)$$

Изменение состояния хотя бы одного компонента говорит об изменении состояния ИИУС. Динамика состояния  $\overline{N}_S^E$  компонента говорит о динамике состояния ИИУС. 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:

$$N_{iS}^E = f(N_{(i-1)S}^E). \quad (32)$$

Переход от одного состояния в другое определяется отношением обеспечивающих характеристик к управляющим:

$$N_{iS}^E = A_{(i-1)G}^E + A_{(i-1)U}^E + \frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E}. \quad (33)$$

Прогноз изменения состояния ИИУС заключается в определении изменения состояния значимого компонента с учетом отношений между ними. В результате исследования получено вероятностное пространство состояний ИИУС (рис.9).

При  $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} = 1$  поведение ИИУС соответствует ИрхС. При

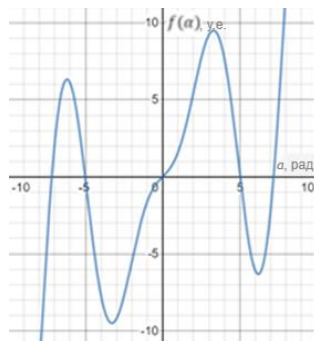


Рис.8. График динамики реактивности ИИУС

$\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} > 1$  неиспользованные обеспечивающие характеристики переходят в развивающиеся – происходит развитие ИИУС, возможно усиление управляющего воздействия. При  $0 < \left| \frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \right| < 1$  и при  $0 < \left| \frac{A_{(i-1)R}^E + A_{(i-1)U}^E}{A_{(i-1)M}^E} \right| < 1$  недостаточное значение обеспечивающих характеристик для выполнения управляющего воздействия – система деградирует или находится в статичном состоянии. Для управления ИИУС необходимо перераспределить обеспечивающие характеристики, выделить зависимости и агрегации между ними, перевести отношения в обобщающие и ассоциативные. Возможно создание обобщающих отношений с другими компонентами с целью увеличения значений обеспечивающих характеристик.

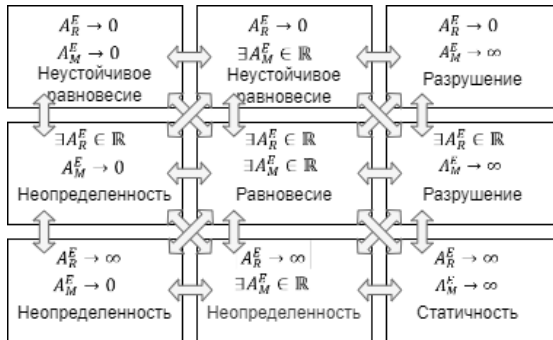


Рис.9. Вероятностное пространство состояний ИИУС

При наличии обратной связи между компонентами ИИУС возможна корректировка управляющего воздействия. Таким образом, для перевода ИИУС в состояние с требуемыми характеристиками необходимо создать

такое управляющее воздействие, при котором  $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \geq 1$ .

Для достоверного прогнозирования и управления состоянием ИИУС необходим мониторинг и анализ накопленных данных обо всех итерациях изменения состояния, в связи с чем далее был разработан **алгоритм анализа и прогнозирования состояния ИИУС**. Необходимо отметить, что в алгоритме предусмотрен механизм определения динамики разового состояния системы путем анализа динамики референтной системы. Функционал алгоритма использует систему итерированных функций следующим образом. Поведение ИИУС в повторяющихся и циклических процессах подобно, значит, повторяющиеся и циклические процессы являются аффинным преобразованием (рис.10).

Для построения системы итерированных функций рассмотрим совокупность сжимающих отображений

- $T_1$ , с коэффициентом сжатия  $s_1 < 1$ ,
- $T_2$ , с коэффициентом сжатия  $s_2 < 1$ ,
- $\vdots$
- $T_m$ , с коэффициентом сжатия  $s_m < 1$ .

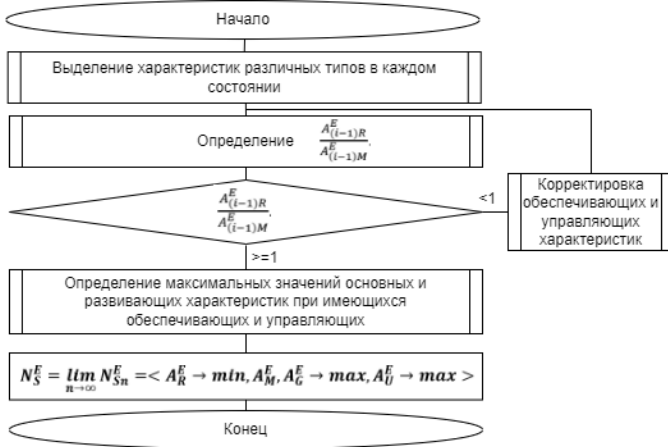


Рис.10. Схема алгоритма анализа и прогнозирования состояния ИИУС

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:

$$T(N_S^E) = T_1(N_S^E) \cup T_2(N_S^E) \cup \dots \cup T_m(N_S^E), \quad N_S^E \in K. \quad (34)$$

Это преобразование ставит в соответствие преобразование состояния  $N_S^E$  из  $K$  в состояние из  $K$ . Итерационная схема имеет вид:

$$\begin{aligned} N_{S_0}^E &= \langle A_R^E, A_M^E, A_G^E, A_U^E \rangle, \\ N_{S_1}^E &= T(N_{S_0}^E), \\ N_{S_2}^E &= T(N_{S_1}^E), \\ &\vdots \\ N_{S_n}^E &= T(N_{S_{(n-1)}}^E), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (35)$$

Для решения задачи прогнозирования состояния ИИУС необходимо определить, когда заданная система итерированных функций порождает предельное множество  $N_S^E$  в смысле сходимости в метрике Хаусдорфа:

$$N_S^E = \lim_{n \rightarrow \infty} N_{S_n}^E. \quad (36)$$

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 процесса. Тогда



$$N_S^E = \lim_{n \rightarrow \infty} N_{Sn}^E = < A_R^E \rightarrow \min, A_M^E, A_G^E \rightarrow \max, A_U^E \rightarrow \max >. \quad (37)$$

Состояние ИИУС стремится к максимальному значению основных и развивающих характеристик, что обеспечит развитие ИИУС с возможностью образования новых состояний.

Оценка точности прогноза состояния ИИУС заключается в определении среднеквадратичных отклонений значений характеристик компонентов 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.

Таким образом, прогнозирование состояния ИИУС 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.

Ситуации связанные с принятием решения в ИИУС содержат множество нелинейных факторов, которые делятся на три группы неопределенностей: внешней среды, внутренних характеристик и целей ИИУС. Как можно заметить, все три группы находят свое отражение в обеспечивающих и управляющих характеристиках ИИУС. Исследование вероятностного пространства состояний ИИУС позволило выделить ситуации:

1)  $A_R^E$  – определено,  $A_M^E \rightarrow 0$ . Для уменьшения неопределенности необходимо создать зависимости, агрегации и композиции между управляющими и обеспечивающими элементами с целью формирования значений для управляющих. После формирования управляющих элементов необходимо перевести отношения в обобщающие и ассоциативные соответственно.

2)  $A_R^E \rightarrow \infty$ ,  $A_M^E$  - определено. Для уменьшения неопределенности необходимо создание реализации между обеспечивающими и развивающими элементами с целью перераспределения значений обеспечивающих. Возможно создание реализации с другими компонентами.

3)  $A_R^E \rightarrow \infty$ ,  $A_M^E \rightarrow 0$ . Для принятия решения и предотвращения бифуркации необходимо создание зависимости, агрегации или ассоциации с другим компонентом с целью определения управляющих и обеспечивающих элементов. После определения элементов отношения следует перевести в обобщения и ассоциации.

Для определения совокупности решений требуется анализ всех изменений состояния ИИУС. При анализе альтернатив с учетом (37) 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  $A_{iU}^E - A_{(i+1)U}^E \rightarrow \max$ . Таким образом, критерием принятия решения в условиях неопределенности является

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

При удовлетворении решения данному критерию необходимо найти такое состояние ИИУС, переход в которое потребует минимума затрат

обеспечивающих характеристик и при этом значительно улучшит основные и развивающие процессы.

При наличии обратной связи управляющее воздействие можно изменить, но критерий принятия решения при этом не изменится.

На основании вышеизложенного разработан алгоритм принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей ИИУС (рис.11).

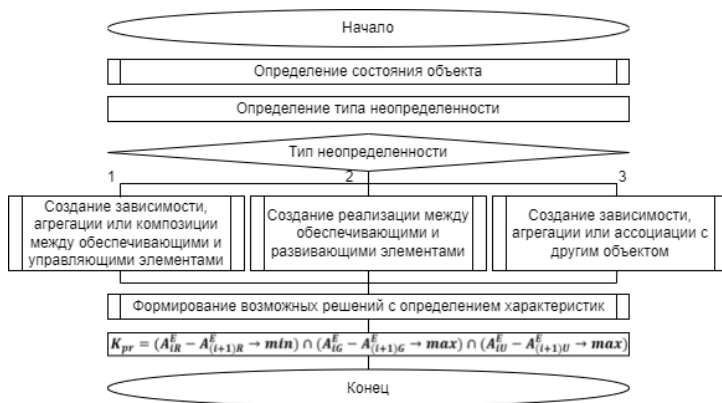


Рис.11. Схема алгоритма принятия решения в условиях неопределенности внешней среды с учетом внутренних характеристик и целей ИИУС

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ разработана методика построения ИИУС на основе предложенных в диссертации моделей и алгоритмов (рис.12).



Рис.12. Методика построения ИИУС

В реальной производственной деятельности одни и те же компоненты используются в различных ИИУС, инициируя тем самым интеграцию систем. Для взаимодействия между компонентами используются интерфейсы, имплементирующие методы получения и передачи данных.

Для определения типа и кратности отношений между объектами разработана информационная модель ИИУС на основе диаграммы классов UML. Модель позволяет определить количество компонентов и тип их соединения (рис.13).



Рис.13. Информационная модель ИИУС

При построении ИИУС следует учитывать среднеквадратичное отклонение значений характеристик значимых компонентов от ожидаемых на протяжении всего жизненного цикла системы, в каждом состоянии, определенном концептуальной моделью. Текущее и критическое значение отклонения определяются для каждой реализации ИИУС. Значения всех характеристик определяются в нормативной и технической документации ИИУС.

Особую сложность при построении ИИУС представляет учет нелинейности системы: состояние производственной среды, исполнительных механизмов и оборудования, внутренних характеристик, человеческий фактор. Нелинейность ИИУС усиливает или ослабляет управляющее воздействие, что приводит к снижению значений основных планируемых характеристик. На основе (37) и условия достижения цели ИИУС с требуемыми характеристиками следует, что для компенсации нелинейности и обеспечения перехода системы в устойчивое состояние необходимо кор-

ректировать обеспечивающие и управляющие характеристики компонента в текущем состоянии так, чтобы  $\frac{A_{(i-1)R}^E}{A_{(i-1)M}^E} \geq 1$  (рис.14).

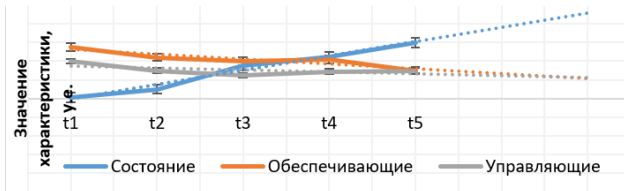


Рис.14. Корректировка обеспечивающих и управляющих характеристик

$$N_S^E(t) = f\left(\frac{A_R^E(t)}{A_M^E(t)}\right);$$

$$A_M^E(t) = A_{M\text{план}}^E(t) + \sum_{i=0}^n a_i A_{N1i}(t) + \sum_{i=0}^m b_i A_{N2i}(t) + \sum_{i=0}^k c_i A_{N3i}(t) \quad (38)$$

где  $A_{M\text{план}}^E$  – планируемое управляющее воздействие;  $A_{N1}$ ,  $A_{N2}$ ,  $A_{N3}$  – воздействие производственной среды, состояние оборудования и человеческого фактора;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – весовые коэффициенты нелинейного фактора.

Из (38) следует, что чем больше нелинейных факторов и их влияние, тем ниже управляемость и наблюдаемость ИИУС. Для снижения влияния нелинейности в ИИУС следует использовать защищенные 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. Стоимость  $s$  решения  $r$  по снижению влияния неопределенности меньше или равной планируемой  $C$ . Время анализа и обработки информации для формирования корректирующего воздействия должно быть меньше общего времени выполнения процесса  $T$ .

$$\begin{cases} A_{N1} \rightarrow \min, & A_{N2} \rightarrow \min, & A_{N3} \rightarrow \min, \\ & sr \leq C, \\ & t \leq T. \end{cases} \quad (39)$$

Решение данной задачи позволит определить количество и тип контрольно-измерительных приборов, тип анализируемой информации и алгоритмы анализа и обработки информации для учета нелинейности при построении ИИУС.

**ПЯТАЯ ГЛАВА** посвящена разработке **нового технического решения в виде смарт-компонента, входящего в состав ИИУС, на основе полученных в диссертации моделей, алгоритмов и методики.**

На основании изложенного в гл. 1-4 следует, что управляемость ИИУС зависит от точности определения значимых компонентов ИИУС, отношений между и ними, и от своевременного контроля и корректи-

ровки их состояния. Очевидно, возникает задача сбора и обработки данных на всех уровнях управления, анализа полученной информации с учетом накопленной в процессе эксплуатации ИИУС и формирования управляющего воздействия, приводящего к цели. Для решения данной задачи в диссертации предлагается использовать смарт-компоненты – программные комплексы, включающие характерные для Индустрии 4.0 элементы.

Разработана архитектура смарт-компонента, состоящего из модулей сбора и кластеризации данных с устройств ввода; оценка состояния ИИУС методами машинного обучения; управления устойчивостью, предиктивной аналитики; формирование управляющих и контролирующих воздействий, рекомендаций по режиму работы оборудования; передачи информации; формирование датасетов состояний ИИУС.

В результате применения разработанной методики построения ИИУС получена типовая архитектура ИИУС со смарт-компонентом (рис.15). Применение смарт-компонента позволяет учесть специфику конкретной системы: назначение, ограничения, нелинейность. Для повышения точности оценки состояния ИИУС учтены все ее характеристики и данные о внешней среде.

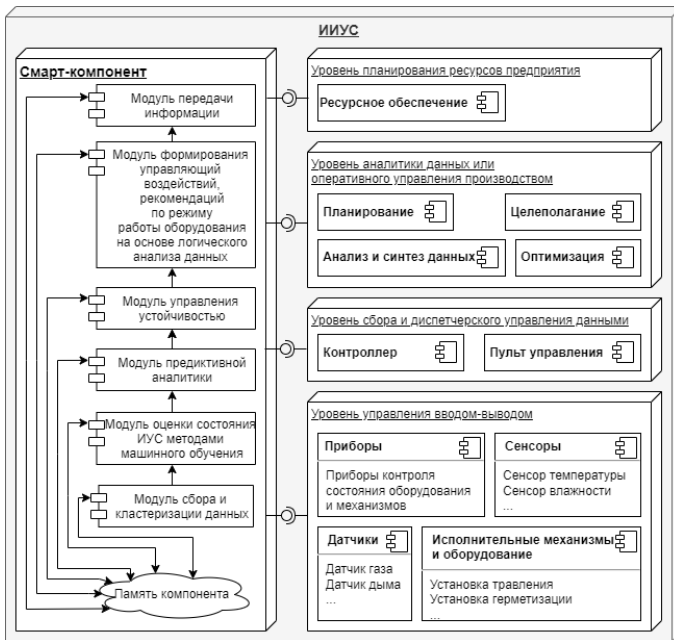


Рис. 15. Архитектура ИИУС со смарт-компонентом

Для анализа и обработки данных в смарт-компоненте о внешних факторах используются методы машинного обучения, в частности, логический анализ данных, результатом применения которого являются закономерности и классификаторы состояний ИИУС. Причем для построения классификаторов используются закономерности с частичным покрытием классификационного признака, с заранее определенными ограничениями и погрешностями на покрытие признака. Редукция построенного классификатора состояний ИИУС производится на основе рекуррентной конъюнкции закономерностей с учетом ограничений и погрешностей покрытий классификационного признака, где  $S_k$  – количество наблюдений противоположных признаку состояний (рис.16). Увеличение количества непокрытых наблюдений является необходимым и достаточным условием остановки редукции классификатора состояний.

Для доказательства рассмотрим функцию ограничения модели оптимизации для частично покрытого признака  $m_k(\varphi) > 0$ :

$$\sum_{\mu \in K^-} y_\mu \leq S, \text{ где } y_\mu = \begin{cases} 0, & \text{если } \sum_{\substack{j=1 \\ \mu_k \neq \gamma_k}}^t p_k \geq 1, \\ 1, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (40)$$

$S$  – число наблюдений противоположного класса.

Оптимизационная модель для поиска закономерностей на основе суммарного количества наблюдений положительного класса имеет вид:

$$\sum_{\omega_k \in K^+} \prod_{j=1}^t (1 - p_k) \rightarrow \max; \sum_{\substack{k=1 \\ \mu_k \neq \gamma_k}}^t p_k \geq 1 \forall \mu \in K^-, p \in \{0,1\}^t, \quad (41)$$

$$p_k = \begin{cases} 1, & \text{если } k - \text{й признак в закономерности,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

С учетом (43) и (44) получим закономерности с небольшой степенью и максимальным покрытием, для которых  $m_k(\varphi) > 0$ . При этом увеличение  $m_k(\varphi)$  приводит к снижению информативности формируемых закономерностей, что противоречит условию задачи. Следовательно, увеличение количества непокрытых наблюдений является необходимым условием для остановки редукции классификатора состояний. Для доказательства достаточности рассмотрим максимальное увеличение степени уже сформированных закономерностей при сохранении количества покрываемых наблюдений своего класса.

$$\sum_{k=1}^t p_k \rightarrow \max, r(P) = r'(P), \quad (42)$$

где  $r(P)$  – покрытие наблюдений своего класса для закономерности до увеличения степени;  $r'(P)$  – покрытие наблюдений своего класса для закономерностей после увеличения степени.

В результате увеличения степени закономерностей для неполных и



Рис.16. Редукция классификатора

неточных данных получается классификатор, состоящий из логических правил с максимальным покрытием и степенью выше исходной. Обобщающая способность такого классификатора выше исходной, что связано с сокращением  $m_k(\varphi)$ . Следовательно, увеличение количества непокрытых наблюдений является достаточным условием для остановки редукции классификатора состояний.

Высокая точность классификации состояний ИИУС при редукции путем рекуррентной конъюнкции закономерностей обусловлена уменьшением среднего значения показателя наблюдений с низким покрытием признака и увеличением среднего значения показателя наблюдений с высоким покрытием признака для набора закономерностей каждого класса.

Для повышения точности оценки состояния ИИУС для каждой закономерности определяется весовой коэффициент

$$a_i = \frac{N_i}{M}, \quad (43)$$

где  $N_i$  – количество совпадений выделенной закономерности в классификаторах;  $M$  – общее количество классификаторов.

Весовой коэффициент принимает значение от 0 до 1, где 1 – наиболее значимая закономерность при оценке состояния ИИУС, 0 – закономерность не имеет значения для определения состояния.

После определения весовых коэффициентов строится граф связности  $D = (V, E)$  для классификаторов состояний, в котором вершинами  $V$  являются закономерности, а ребрами  $E = (u, v): u, v \in V$  – связи между ними, вес ребра – значение  $a_i$ . Далее строится аналогичный по структуре граф  $D' = (V', E')$  критериев оценки состояния ИИУС – нормативные и критические значения исследуемых характеристик и параметров. С учетом положений нечеткой логики происходит сравнение вершин графов:

$$V \subset V' \Leftrightarrow \forall v \in V: \mu_V(v) \leq \mu_{V'}(v);$$

$$l(V \subset V') = \min_{v \in T} \mu_{V'}(v) : T = \{v \in V; \mu_V(v) \leq \mu_{V'}(v); \mu_V(v) > 0\}. \quad (44)$$

В случае выполнения условий (47) происходит маркировка узла графа классификаторов состояний. Далее рассчитывается путь между маркированными узлами, используемый при расчете оценки состояния ИИУС. 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:

$$G = \sum_{i=1}^{n-1} f(e_i, e_{i+1}). \quad (45)$$

Поочередное сравнение закономерностей характеристик ИИУС с критериями оценки состояния позволяет уменьшить нечеткость сравниваемых множеств и повысить точность оценки.

Значение оценки состояния ИИУС находится в интервале  $[0, 1]$ , который может быть разделен на конечное число подинтервалов, каждому из которых ставятся в соответствие управляющие и контролируемые воздействия и рекомендации по режиму эксплуатации оборудования.

Как видно из формул, точность оценки состояния определяется точностью весового коэффициента. Среднеквадратичное отклонение весового коэффициента для  $n$  итераций работы ИИУС  $\sigma = \sqrt{\frac{\Delta(a-a_{cp})^2}{n}}$  уменьшается с увеличением итераций. Исследование материалов отчетов по 20 итерациям работы трех ИИУС производственного предприятия позволило установить, что отклонение весового коэффициента от ожидаемого значения менее 0,001 после 7 итерации и далее продолжает уменьшаться (рис.17). Точность прогноза состояния ИИУС после 7 итераций составляет 90,1% и далее продолжает расти.

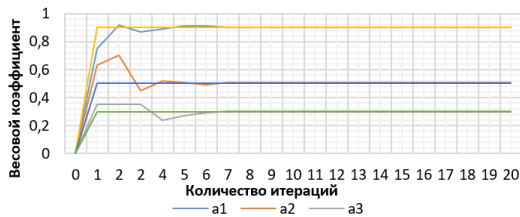


Рис.17. Значение весового коэффициента

Таким образом, смарт-компонент в составе ИИУС позволяет эффективно управлять производственным процессом за счет высокой точности оценки состояния системы и прогноза ее динамики более 90%.

В ШЕСТОЙ ГЛАВЕ приведены результаты практической апробации программной реализации предложенных решений в виде смарт-компонента в составе ИИУС для нанолитографии на основе МЭМС - динамической маски для формирования наноструктур с размерами от 13нм и ниже на базе синхротронного и/или плазменного источника.

ИИУС 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; формирования управляющий воздействий для установок и систем; управления в исключительных ситуациях; формирования рекомендаций по улучшению работы нанолитографа (рис.18). Обобщенная модель ИИУС нанолитографа представляет собой совокупность элементов

$$N = \langle K, P, U, F, D, O_1, O_2, O_3, O_4 \rangle, \quad (46)$$

где  $K$  – контрольно-измерительное оборудование;  $P$  – программируемый логический контроллер (ПЛК);  $U$  – программные модули;  $F$  – предельные значения контролируемых параметров ( $k, f$ ):  $k \in K$ .  $O_1 - K \times U$ .  $O_2 - K \times F$ .  $O_3 - P \times U$ .  $O_4 - P \times F$ .

Модель смарт-компонента ИИУС для нанолитографии имеет вид:

$$N^S = \langle K^S, P^S, U^S, Z, O_1^S, O_5, O_3^S, O_6 \rangle, \quad (47)$$



где  $K^S$  – 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;  $(k^S, z_i): k^S \in K^S, \exists z_i \in \{1, 0\}$ ;  $O_1^S - K^S \times U^S$ ;  $O_5 - K^S \times Z$ ;  $O_3^S - P^S \times U^S$ ;  $O_6 - P^S \times Z$ .

На основе сравнения моделей  $N$  и  $N^S$  с использованием графового представления и (44), (45) вычисляется оценка управляемости ИИУС для нанолитографии; формируются рекомендации по повышению эффективности управления процессом нанолитографии.

Аналогично сделан вывод об управляемости ИИУС вакуумной установкой; оптической системы и системы совмещения и экспонирования.

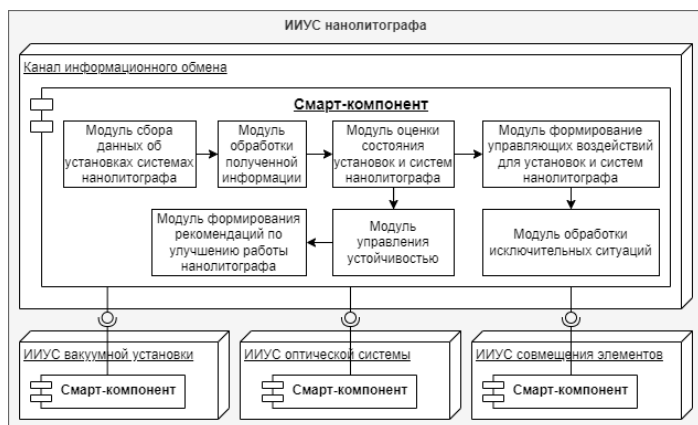


Рис.18. Архитектура ИИУС нанолитографа

В качестве компонентов ИИУС нанолитографа использованы ПЛК «Багет-ПЛК1», оптические датчики KIPPRIBOR OK30, терморегулятор DigiTOP ТК-4 с выносным датчиком температуры, измеритель давления Мератат-ВИТ16Т3, датчик вибрации IFM Electronic VKV021.

Для оценки управляемости разработанной ИИУС для нанолитографии 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.19). 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.

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 ИИУС для нанолитографии с помощью смарт-компонента на 36% выше традиционного способа.



Рис.19. Время выполнения операции совмещения и экспонирования элементов в процессе нанолитографии

Оценка эффективности полученных результатов диссертационной работы проводилась с помощью функции полезности<sup>1</sup>.

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  $P \cdot X \leq R$ , где  $P$  – уровень достижения цели с помощью соответствующей альтернативы,  $X$  – вектор альтернатив и  $R$  – предполагаемая цель. Тогда

$$\begin{cases} u(x) \rightarrow \max, \\ px \leq R, \\ x \in X. \end{cases} \quad (48)$$

В качестве альтернатив предлагается использовать модели ИИУС, предложенные в настоящей работе, и существующие модели ИИУС. Целью является получение модели ИИУС, учитывающей все ее характери-

<sup>1</sup> См. определения и терминологию теории полезности.

стики и позволяющей прогнозировать изменение ее состояния. Для удобства расчетов цель разбита на ряд задач. 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 1). Максимальный уровень достижения цели равен 10.

Таблица 1. 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	5
8	Принятие решения в условиях неопределенности внешней среды	10	3

Решение задачи максимизации полезности позволяет определить, что применение полученных в настоящей диссертационной работе теоретических основ и принципов построения ИИУС эффективнее на 51% по сравнению с существующими решениями.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ содержатся обобщающие выводы подтверждающие теоретические положения, выносимые на защиту, а также результаты анализа характеристик разработанных моделей, алгоритмов и методики. Предложены рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования для использования в ИИУС различных предметных областей.

В ПРИЛОЖЕНИЯХ приводятся акты о внедрении результатов диссертационной работы, фрагменты листингов программного модуля анализа и прогнозирования состояния ИИУС.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения диссертационной работы разработаны теоретические положения, направленные на повышение управляемости ИИУС для микро- и наноэлектроники 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 и разработанных в диссертации моделей, алгоритмов и методики – наличие в составе ИИУС смарт-ком-

понента, который 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 НОЧУ ВО МУППИ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 79 работах, основными являются.

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых Scopus*

1. Шевнина Ю.С. Моделирование состояния технологического оборудования в составе информационно-управляющей системы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. №1. С. 29-35.

2. Шевнина Ю.С. Автоматический поиск решения в информационно-управляющей системе для контроля состояния производственной среды // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22. № 2. С. 19-25.

3. Шевнина Ю.С. Управление системой контроля поверхностных дефектов изделий микроэлектроники // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2024. Т. 30. №2. С. 234-246.

4. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Подходы к оценке управляемости сложной информационной системы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. № 3. С. 33-38.

5. 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. 2024. Т. 12. № 2(45). С. 15-22.

6. Shevnina Yu.S., Gagarina L.G., Konyuhov E.V. Modeling of a Digital Twin of an Automated Production Process // 2024 International Russian Smart

Industry Conference (SmartIndustryCon), IEEE, Sochi, Russian Federation, pp. 917-922.

7. Shevnina Yu.S., Tsarapkin S.F., Si Thu Thant Sin Processing of nonlinear heterogeneous data in information and control systems // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), IEEE, Sochi, Russian Federation, pp. 726-731.

8. 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. 2024. 1130, pp. 137-147.

9. 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 pp. 2076-2080.

10. 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. T. 295. pp. 13.

11. Shevnina, Ju.S., Gagarina, L.G., Chirkow, A.V. On the Issue of Modeling Complex Nonlinear Systems // AIP Conference Proceedings 2467, 2021. pp. 565.

12. 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. pp. 345.

#### *Результаты интеллектуальной деятельности*

13. 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.

14. 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.

15. Шевнина Ю.С. Программа для оценки состояния АСУ ТП и формирования управляющего воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022618445, 06.05.2022.

16. 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.

17. 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.

18. Шевнина Ю.С., Портнов Е.М., Дорогов В.Г., Машевич П.Р. Программный модуль стенда управления совмещением компонентов при литографии. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022669635. 21.10.2022.

19. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С., Машевич П.Р., Тихонов М.Р. Программа имитации управления динамической маской нанолитографа. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022669636, 21.10.2022.

20. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С., Дюжев Н.А., Кремер Е.А. Программный модуль симуляции управления вакуумной установкой для автоматизации производства изделий микроэлектроники. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022669637. 21.10.2022.

21. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С., 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.

*Научные статьи в рецензируемых журналах*

22. Шевнина Ю.С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27. №3. С. 407-415.

23. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Конюхов Е.В., Харитонов А.Д. Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики // Известия вузов. Электроника. 2023. № 4. С. 537-546.

24. Шевнина Ю.С. Метод декомпозиции сложной нелинейной системы на основе процессного подхода // Системы управления и информационные технологии. 2021. №3(85). С. 24-29.

25. Шевнина Ю.С. Иерархическая модель нелинейной динамической системы // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2021. №8. С. 135-139.

26. 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.

27. Шевнина Ю.С. Автоматизация мониторинга параметров производственной среды с использованием смарт структур // Автоматизация. Современные технологии. 2022. №2. С. 47-59.

28. Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г. Подходы к автоматизации процессов центров коллективного проектирования микроэлектроники // Информационные технологии и вычислительные системы. 2021. №4. С. 3-16.

29. 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 государственного технического университета. 2021. Т. 17. №4. С. 50-57.

30. Шевнина Ю.С., Буравов А.Н. Разработка автоматизированной системы учета рабочего времени сотрудников предприятия // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 1. С. 561–566.

*Монографии*

31. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С. Основы проектирования и разработки информационных систем – М.: Инфра-М, 2024 – 238 с.

32. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С. Разработка и эксплуатация автоматизированных систем – М.: Инфра-М, 2024 –382 с.

33. Гагарина Л.Г., Шевнина Ю.С., Лукьянова Е.Н., Лукьянова Ю.А. Информационные системы и технологии. – М.: МИЭТ, 2023 – 174 с.

34. 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.

Авторское редактирование

Подписано в печать 13.09.2024

Формат бумаги 70x100 <sup>1/16</sup>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,1. Тираж 100 экз. Заказ 101к

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95