

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**ПУЖАНОВА Екатерина Олеговна**

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗРЕЛОСТИ  
МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА  
ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ**

Специальность: 2.3.4. Управление в организационных системах

**Диссертация**

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н. Цветков Александр Васильевич

Воронеж – 2026

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Облачные инструменты моделирования бизнес–процессов в организационных системах .....</b>	<b>14</b>
1.1. Жизненный цикл бизнес-процессов и управление бизнес-процессами .....	15
1.2. Моделирование бизнес–процессов – классический подход .....	16
1.3. Облачная среда для моделирования бизнес-процессов .....	20
1.4. Методы исследования .....	22
1.5. Постановка задач работы .....	28
Источники к главе 1 .....	30
<b>2. Управляемая событиями совместная стабилизация многоагентных систем с частично неизвестной взаимосвязанной динамикой.....</b>	<b>33</b>
2.1. Проблема стабилизации во взаимосвязанных многоагентных организационных системах .....	33
2.2. Используемые инструменты .....	40
2.3. Взаимосвязанные мультиагентные системы .....	42
2.4. Имитационная верификация .....	60
2.5. Выводы .....	66
Источники к главе 2 .....	68
<b>3. Адаптивная мультиагентная система с контролем действий агентов на основе модального подхода к сознанию агентов .....</b>	<b>72</b>
3.1. Осознание и контент .....	72
3.2. Сознательные агенты .....	75
3.3. Осведомленность .....	80
3.4. Надежность .....	83
3.5. Адаптивность .....	87
3.6. Окружение и основные результаты .....	89
Источники к главе 3 .....	93
<b>4. Практическое управление проектами и уровнем зрелости организационной системы.....</b>	<b>96</b>
4.1. Разработка алгоритма совершенствования стратегии повышения уровня зрелости организационной системы при управлении проектами .....	96
4.2. Развитие компетенций с использованием матрицы принятия решений .....	107
4.3. Практическое применение методологии прогрессивного пакетирования работ (AWP) в системе PM.portal.....	123

Источники к главе 4 .....	132
<b>Заключение .....</b>	<b>135</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>137</b>

## **Введение**

**Актуальность темы.** Под влиянием развития технологий и средств связи изменения в управлении организационными системами стали повсеместными. Функциональное управление перестало рассматриваться как предпочтительное, оно ограничивает возможности организации реагировать на изменения. Поэтому на первый план выходит управление проектами, которое предназначено для решения задач изменения текущего состояния систем управления или функционирования и создания новых продуктов или услуг. Актуальна задача управления проектами в организационных системах, большой вклад в разработку методов и средств внесли Баркалов С.А., Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А., Mills J., Platts К. и другие ученые.

Одной из актуальных предметных областей задач управления мультиагентными организационными системами является определение уровня зрелости организационной системы в управлении проектами. Интерес представляет и совместная оптимальная стабилизация для устранения неопределенности моделирования совместно с отделением сбоев и помех (на уровне агентов) от кибератак (на уровне управления). Важной является и прогрессивное пакетирование работ в организационной системе, качество которого отражает возможность формирования взаимосвязанных пакетов проектов и принципов внутрипроектного взаимодействия участников.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью разработки специальных средств управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

Тематика диссертационной работы соответствует научному направлению ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

**Целью работы** является разработка специальных средств управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ проблем управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

2. Разработать смешанную модель взаимосвязанных мультиагентных организационных систем, обеспечивающую устранение неопределенности моделирования совместно с отделением сбоев и помех (на уровне агентов) от кибератак (на уровне управления).

3. Создать формализацию свойства осознанности агентов мультиагентной организационной системы обеспечивающую получение оценки полноты осведомленности.

4. Предложить метод определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами, обеспечивающий минимизацию субъективности при классификации организационной системы по категориям зрелости и формирование обоснованной стратегии развития и повышения уровня зрелости.

5. Разработать методологию прогрессивного пакетирования работ в организационной системе, обеспечивающую формирование перечня рекомендаций по формированию взаимосвязанных пакетов и принципов по внутрипроектному взаимодействию участников.

6. Разработать архитектуру программной системы, обеспечивающую мониторинг отклонений, формирование иерархической структуры проектов и управление пользовательскими задачами.

**Объект исследования:** процессы управления оценкой уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой

оптимальной стабилизации.

**Предмет исследования:** структура и методология обеспечения процессов управления оценкой уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

**Методы исследования.** При решении поставленных в диссертации задач использовались методы теории вероятностей, теории принятия решений, теории графов, а также методы объектно-ориентированного программирования.

**Тематика работы** соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.4 «Управление в организационных системах»: п. 3. «Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах»; п. 7. «Разработка моделей и методов управления организационными проектами».

**Научная новизна работы.** В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- смешанная модель взаимосвязанных мультиагентных организационных систем, отличающаяся основанная на теории графов двухуровневым инструментом совместной оптимальной стабилизации и обеспечивающая устранение неопределенности моделирования совместно с отделением сбоев и помех (на уровне агентов) от кибератак (на уровне управления);

- формализация свойства осознанности агентов мультиагентной организационной системы, отличающаяся учетом осведомленности, силы признака и сознания с использованием многомерных динамических конусов в пространстве действий, и обеспечивающая получение оценки полноты осведомленности;

- метод определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами, отличающийся наличием полного цикла эволюции каждого бизнес-процесса с учетом оценок по ключевым показателям и

обеспечивающий минимизацию субъективности при классификации организационной системы по категориям зрелости и формирование обоснованной стратегии развития и повышения уровня зрелости;

- методология прогрессивного пакетирования работ в организационной системе, отличающаяся выделением нескольких уровней и подуровней при формировании зон и учетом фаз проекта и обеспечивающая формирование перечня рекомендаций по формированию взаимосвязанных пакетов и принципов внутривнутрипроектного взаимодействия участников;

- архитектура программной системы PM.portal, отличающаяся использованием подсистемы стабилизации мультиагентных систем и обеспечивающая мониторинг отклонений, формирование иерархической структуры проектов и управление пользовательскими задачами.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** заключается в разработке структуры и методологии обеспечения процессов управления оценкой уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

Теоретические результаты работы могут быть использованы в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся проектированием организационных систем с мультиагентным управлением.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Смешанная модель взаимосвязанных мультиагентных организационных систем обеспечивает устранение неопределенности моделирования совместно с отделением сбоев и помех (на уровне агентов) от кибератак (на уровне управления).

2. Формализация осознанности агентов мультиагентной организационной системы обеспечивает получение оценки полноты осведомленности.

3. Метод определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами обеспечивает минимизацию субъективности при классификации организационной системы по категориям зрелости и фор-

мирование обоснованной стратегии развития и повышения уровня зрелости.

4. Методология прогрессивного пакетирования работ в организационной системе реализует формирование перечня рекомендаций по формированию взаимосвязанных пакетов и принципов внутрипроектного взаимодействия участников.

5. Архитектура программной системы PM.portal обеспечивает мониторинг отклонений, формирование иерархической структуры проектов и управление пользовательскими задачами.

**Результаты внедрения.** Основные результаты внедрены в АО ПМСОФТ (г. Москва) при проектировании и сопровождении организационных систем с растущим уровнем зрелости, в учебный процесс Воронежского государственного технического университета в рамках дисциплин: «Управление проектами», «Управление в технических системах», а также в рамках курсового и дипломного проектирования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной научно-практической конференции «Теория активных систем» (Москва, 2014); X Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2015); 4-й Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Моделирование и наукоёмкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (Новокузнецк, 2016); шестой международной научно-практической конференции «Комплексный инжиниринг в нефтегазодобыче: опыт, инновации, развитие» (Самара, 2024); XXXI-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2026'AS)» (Yelm, WA, USA, 2026), а также на научных семинарах кафедры управления ВГТУ

(2023-2026 гг.).

Достоверность результатов обусловлена корректным использованием теоретических методов исследования и подтверждена результатами сравнительного анализа данных вычислительных и натуральных экспериментов.

**Публикации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 21 научная работа, в том числе 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 1 – в издании, индексируемом в WoS и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ). В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [4, 7, 15] - смешанная модель взаимосвязанных мультиагентных организационных систем, отличающаяся основанная на теории графов двухуровневым инструментом совместной оптимальной стабилизации; [13, 21] - формализация свойства осознанности агентов мультиагентной организационной системы, отличающаяся учетом осведомленности, силы признака и сознания с использованием многомерных динамических конусов в пространстве действий; [3, 5, 6, 11, 12, 14] - метод определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами, отличающийся наличием полного цикла эволюции каждого бизнес-процесса с учетом оценок по ключевым показателям и обеспечивающий минимизацию субъективности при классификации; [2, 9, 10, 17] - методология прогрессивного пакетирования работ в организационной системе, отличающаяся выделением нескольких уровней и подуровней при формировании зон и учетом фаз проекта; [8, 16] - архитектура программной системы PM.portal, отличающаяся использованием подсистемы стабилизации мультиагентных систем.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 135 наименований. Работа изложена на 150 страницах.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации и внедрении работы.

**В первой главе** исследуются проблемы управления оценкой уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации. Отмечено, что повысить эффективность такого управления можно путем применения смешанной модели взаимосвязанных мультиагентных организационных систем для устранения неопределенности моделирования, исследования адаптивной мультиагентной системы с контролем действий агентов на основе модального подхода к их сознанию, специальных методов определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами для минимизации субъективности при классификации организационной системы по категориям зрелости и формирования обоснованной стратегии развития и повышения уровня зрелости.

Прикладные аспекты управления организационными системами также нуждаются в развитии. В частности, внимание уделено необходимости использования методологии прогрессивного пакетирования работ в организационной системе для формирования перечня рекомендаций по формированию взаимосвязанных пакетов и принципов внутрипроектного взаимодействия участников. В части реализации прикладных компонент обоснована необходимость развития архитектуры программной системы РМ.portal для обеспечения мониторинга отклонений, формирования иерархической структуры проектов и управления пользовательскими задачами.

Сформулирована цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена управляемой событиями совместной стабилизации многоагентных организационных систем с частично неизвест-

ной взаимосвязанной динамикой. С точки зрения управления, основное внимание в организационных системах уделяется использованию встроенных сенсорных, коммуникационных и вычислительных технологий. В частности, использование (беспроводных) коммуникационных технологий поднимает ряд новых проблем в дополнение к проблемам традиционно управляемых систем, которые должны быть решены разработчиком системы управления.

Для эффективной формулировки и решения множества вышеупомянутых проблем как для одно-, так и для многоагентных организационных систем (CPS) требуется новая структура проектирования управления. Рассматривается класс взаимосвязанных систем MAS, подверженных согласованным или несогласованным неопределенностям моделирования как на уровне агентов, так и на уровне MAS. Предлагается теоретико-графовый подход к моделированию взаимодействия между динамиками агентов на уровне агентов, который соответствует физическому уровню CPS, и разработке протокола распределенной стабилизации на основе связи на уровне управления, который напоминает киберуровень CPS. Эта двухуровневая структура позволяет решать задачи, связанные с управлением. В частности, устранено влияние неопределенностей моделирования на агентском или физическом уровне. Предлагаемый подход к оптимальному управлению подробно представлен двумя модифицированными задачами линейного квадратичного регулирования, по одной для каждого из сценариев неопределенности моделирования. Стратегия каждого агента, основанная на событии (ETS), отличается от стратегии других агентов и формулируется с использованием не более двух несвязанных импульсных аппроксиматоров.

**Третья глава** посвящена адаптивной мультиагентной системе с контролем действий агентов на основе модального подхода к сознанию агентов.

Рассматриваются свойства осведомленности и выражаются они как в логической, так и в числовой формах. Затем формализуются осведомленность и сознание и доказываются обоснованность законов.

Были предложены логические законы для осознания и, следовательно, для сознания (рассматриваемого как осознание осознанности), а также неравенства для его силы. Было показано, что они верны, несмотря на рефлексивность, необходимую для сознания, в очень простой модели.

Предложена формализация свойства осознанности агентов мультиагентной организационной системы, отличающаяся учетом осведомленности, силы признака, сознания с использованием многомерных динамических конусов в пространстве действий, и обеспечивающая оценки полноты осведомленности.

**В главе 4** проанализировано практическое управление проектами и уровнем зрелости организационной системы.

Сначала рассматривается подход к разработке комплексного показателя, отражающего уровень развития организационных компетенций в управлении проектами, используя модель на основе подхода к повышению качества уровня зрелости, который предусматривает реализацию эффективных мероприятий при минимальных финансовых затратах.

Метод, представленный в исследовании, позволяет оценивать уровень зрелости организационных способностей управления проектами на основе следующих ключевых составляющих:

- подход к управлению проектами в рамках организационных способностей предприятий;
- подход к анализу частичной характеристики согласуется с принципами, заложенными в модели целостности;
- факторы, определяющие степень развития составляющей, заключаются в углублении эффективности управления проектами;
- улучшение методической составляющей и, как следствие, повышение

ние организационных способностей достигаются посредством непрерывного совершенствования бизнес-процессов, лежащих в основе методики организации работы. Каждый бизнес-процесс в компании должен пройти полный цикл эволюции, включающий этапы стандартизации, количественной оценки, контроля и постоянного совершенствования.

Предложен метод определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами, отличающийся наличием полного цикла эволюции каждого бизнес-процесса с учетом оценок по ключевым показателям и обеспечивающий минимизацию субъективности при классификации организационной системы по категориям зрелости и формирование обоснованной стратегии развития и повышения уровня зрелости.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

## **1. Облачные инструменты моделирования бизнес-процессов в организационных системах**

Среда облачных вычислений обладает некоторыми базовыми характеристиками, которые описаны в контексте основных функций, моделей обслуживания и моделей развертывания [1.16]. Влияние облачных вычислений показано как одна из тенденций в разработке организационных стратегий новых бизнес-моделей [1.12, 1.13], а методы управления бизнес-процессами и моделирования бизнес-процессов изменяются с помощью облака для повышения конкурентоспособности жизненного цикла бизнес-процессов в управлении организацией, снижения затрат и повышения гибкости бизнес-процессов. Облачные вычисления могут предложить множество возможностей для улучшения управления бизнес-процессами в организации и использования информации

Важно показать влияние облачной вычислительной среды на моделирование бизнес-процессов и управление ими на основе обзора литературы. Набор данных исследования был основан на литературных источниках Scopus, Web of Science и EBSCOhost. Сначала рассматриваются основы систем управления бизнес-процессами. Также показаны некоторые классические методы управления бизнес-процессами и инструменты, основанные на нотации BPMN, UML и сетях Петри. Далее облачные модели, которые оказывают влияние на методы бизнес-моделирования и называются в литературе BPaaS, eBPM и BPMaaS. Методология исследования была описана в пятой главе. Согласно обзору литературы, были сформулированы две гипотезы, а именно: H1: Облачные решения влияют на развитие бизнес-процессов в области жизненного цикла проекта в контексте использования инструментов моделирования бизнес-процессов; H2: Облачные решения влияют на развитие управления бизнес-процессами. В качестве методов исследования использовались алгоритмы поиска, основанные на сборе

данных, с использованием компьютерных средств. Результаты были представлены в виде таблиц и рисунков.

### **1.1. Жизненный цикл бизнес-процессов и управление бизнес-процессами**

Бизнес-процесс определяется как серия или сеть действий с добавленной стоимостью, выполняемых соответствующими ролями или сотрудниками для целенаправленного достижения общей бизнес-цели [1.15]. Согласно [1.4], бизнес-процессы можно разложить на элементарные виды деятельности, они имеют четко определенные границы входа и выхода, интегрированы с организацией, владельцем процесса, измеримыми целями, количественными, качественными и ценностными показателями эффективности и обеспечивают дополнительную ценность. Управление бизнес-процессами в организации требует внедрения итеративной процедуры жизненного цикла процесса [1.9]. Описание жизненного цикла бизнес-процессов Oracle приведено в табл. 1.1.

Бизнес-процессы можно разделить на 3 группы [1.9].

Процессы управления – процессы планирования, постановки целей развития.

Операционные процессы – процессы, связанные с деятельностью организации, ведущие к созданию продуктов/услуг.

Вспомогательные процессы – имитационное управление и эффективные операционные процессы.

ИТ-решения для управления бизнес-процессами (BPMS – Системы управления бизнес-процессами) предназначены для комплексного управления существующими бизнес-процессами в организации, а также для их постоянной оптимизации и совершенствования. Функциональные возможности BPMS по оптимизации процессов включают в себя следующие возможности [1.14]: устранение дублирующихся действий и задач, устранение

разрывов в потоке процессов, устранение простоев и задержек в реализации процессов, а также поддержка моделей управления качеством.

Таблица 1.1

Жизненный цикл бизнес-процесса в соответствии с Oracle

Фаза	Активности	Область активностей
Анализ бизнес-процессов	Идентификация бизнес-процессов Разработка карт бизнес-процессов Детальное моделирование с использованием визуальных обозначений Планирование эффективности и качества процессов	Моделирование, имитация
Выполнение бизнес-процессов	Внедрение и реализация внедренных процессов	Внедрение, реализация
Мониторинг бизнес-процессов	Сбор данных о бизнес-процессах измеряет ценность Отчет Оценка влияния бизнес-процессов на организацию	Мониторинг, совершенствование

**1.2. Моделирование бизнес-процессов – классический подход**

В [1.10] представлено 16 отобранных стандартов моделирования бизнес-процессов, разделенных на 2 основные категории: адаптированные стандарты визуального моделирования и специализированные стандарты визуального моделирования. Ниже приведены некоторые из наиболее популярных стандартов, в которых особое внимание уделяется нотации BPMN.

### 1.2.1. BPMN

BPMN расшифровывается как модель бизнес-процесса и нотация, это графический стандарт для представления бизнес-процессов, созданный и развиваемый Object Management Group (OMG). Первая версия стандарта BPMN (2.0) была представлена в 2011 году и доступна в режиме онлайн по адресу [www.omg.org](http://www.omg.org) как открытый стандарт для всех [1.8]. Одним из важных аспектов использования нотации BPMN является возможность преобразования визуальной модели в исполняемый файл на основе тегов XML. Это реализовано с использованием технологии Business Process Execution Language (BPEL) [1.19]. Структура ядра и слоя BPMN представлена в работе [1.18]. Нотация BPMN 2.0 представлена в виде 4 диаграмм: диаграмма процесса, диаграмма совместной работы, диаграмма хореографии и диаграмма диалога. В табл. 1.2 кратко описана каждая из диаграмм.

Согласно [1.8], в модели бизнес-процессов может существовать 3 уровня детализации модели, описанные в табл. 1.3.

Таблица 1.2

Типы моделей бизнес-процессов и нотационных диаграмм

Модель	Цель	Описание
Схема процесса	Визуализация	Служит для иллюстрации сложных под-процессов, задач и других аспектов объектов
Схема совместной работы	Обмен информацией	Обмен информацией между участниками бизнес-процесса
Схема о	Взаимодействие	Служит для координации взаимодействия участников бизнес-процесса
Схема переговоров	Взаимодействие	Объединение усилий между деловыми партнерами

Уровень детализации модели бизнес-процессов

Тип модели	Описание
Иллюстративная модель	Показывает общий ход бизнес-процесса, без учета технических аспектов, таких как параметры условного потока, типы задач и действий, неразвитые подпроцессы, объекты данных в модели не представлены
Аналитическая модель	Показывает оценку работ по внедрению исполняемого процесса. Указаны типы операций и задач, разработанные подпроцессы обработаны, объекты данных показаны на модели без определения
Исполняемая модель	Используется для точного описания выполняемого процесса, все объекты и параметры отображаются на модели с их определениями

Стандарт BPMN завоевал популярность благодаря своей простоте, универсальности и открытости. Простота этой нотации не ограничивает возможности создания сложных моделей и, кроме того, обеспечивает большую ясность и разборчивость как для владельцев бизнеса, так и для команды управления проектами, а также для технического персонала.

### ***1.2.2. UML с профилем для бизнес-моделирования***

В программной инженерии стандартом для моделирования различных явлений, таких как поток данных, последовательность действий, варианты использования при разработке систем, является унифицированный язык моделирования – нотация, состоящая из 13 основных диаграмм и 4 абстрактных схем.

Из всех UML-диаграмм можно выделить диаграмму активности и диаграмму состояния. Эти типы диаграмм могут быть реализованы при

моделировании бизнес-процессов. Диаграмма активности - это тип поведенческой диаграммы, состоящий из действий, активностей, потоков (поток управления, поток объектов) и узлов. Аналогично BPMN, в нем также существуют дорожки для плавания и разделы. Диаграмма состояний (state machine diagram) также является примером поведенческой диаграммы, она показывает состояния системы и события в системе, которые вызывают переход из одного состояния в другое [1.25]. Состояние объекта определяется значением его атрибутов и отношениями между другими объектами. Событие - это изменение значения состояния объекта, оно происходит в определенный момент времени, и состояние объекта определяет реакцию на событие. Переход - это взаимосвязь, представляющая изменение состояния объекта на другое состояние [1.7].

### ***1.2.3. Сети Петри и событийно-управляемая цепочка процессов***

Концепция связи между асинхронными компонентами компьютерной системы была введена в [1.20]. В настоящее время сети Петри, основанные на математических принципах, широко используются для моделирования различных явлений, включая бизнес-процессы. Сеть Петри основана на трех зависимостях: Последовательность, Альтернатива, параллельная последовательность.

В моделировании бизнес-процессов сети Петри в основном используются для поиска зависимостей между объектами потока и для указания альтернативных путей [1.6]. Согласно [1.19], использование сетей Петри в моделировании бизнес-процессов является наиболее точным и детерминированным благодаря формальной математической модельной базе и должно использоваться для детальной записи и управления процессами в организации.

Событийно-управляемая цепочка процессов представляет собой упрощенную нотацию сети Петри, более гибкую и простую для понимания,

чем классическая сеть Петри. Нотация EPC основана на элементах событий и действий и связях между ними. Пример процесса EPC используется в нотации ARIS [1.3]. События в нотации EPC отвечают за определение предусловия и постусловия функции. Для принятия решений используются логические операторы. Каждый EPC-процесс начинается с события starting, заканчивается событием ending и имеет следующие ограничения [1.2]: события не могут принимать решения OR/XOR.; только дополнительный процесс может подключаться к функции EPC; события должны быть связаны с оператором И; а для принятия решений функции могут быть связаны со всеми логическими операторами (AND, OR, XOR).

### **1.3. Облачная среда для моделирования бизнес-процессов**

#### ***Бизнес-процесс как услуга***

BPaaS - это относительно новая концепция моделирования бизнес-процессов в облачной среде. Решения, также известные как BPMC (Business Process Management Cloud), обеспечивают функциональность моделирования, оптимизации, внедрения, мониторинга и отчетности бизнес-процессов. Нет никакой разницы в функциональности между классическими локальными решениями BPMS и BPMC, различаются только способы совместного использования, разработки, улучшения и масштабируемости для организации и конечных пользователей [1.11].

Согласно [1.11], BPaaS - это всеобъемлющая модель облачных вычислений, основанная на моделях IaaS, PaaS и SaaS, интегрирующих сервисы, полученные на основе подмоделей [1.11].

Программное обеспечение BPMC должно соответствовать 5 основным характеристикам [1.5]:

- 1) Основываться на опыте пользователя - для упрощения сложных операций по моделированию бизнес-процессов;
- 2) Быть совместимым с документами - из-за критического характера

документации при моделировании бизнес-процессов. Смоделированный процесс будет более понятен благодаря четкой и простой документации;

3) Предоставляет возможность совместной работы - доступ к проектам для каждой команды независимо от времени и места;

4) Библиотека процессов - возможность архивировать работу, управлять версиями и быстро реинжиниринговать существующие устаревшие процессы;

5) Поддержка нотации BPMN 2.0 - избегайте использования устаревшей нотации для улучшения коммуникации и создания понятных процессов.

Моделирование бизнес-процессов в облачной среде может оказать положительное влияние на успех проекта [1.17].

### ***Эластичный бизнес-процесс в ВРМааS***

Управление бизнес-процессами требует высокого качества программных услуг, и организации в настоящее время способны быстро реагировать на меняющиеся требования к вычислительным ресурсам. Облачный ВРМ позволил повысить гибкость управления бизнес-процессами. Вопросы разработки облачной модельной среды охватывают архитектуру гибкой системы управления бизнес-процессами в контексте существующей работы по планированию, распределению ресурсов, мониторингу, децентрализованной координации и управлению состоянием для эластичных процессов [24], т.е. процессов, которые выполняются с использованием эластичных облачных ресурсов. Подход к управлению эластичными бизнес-процессами (еВРМ), который был оценен в облаке, и новая модель разработки была названа ВРМАА (ВРМ как услуга) [22, 23], которые имеют возможность выполнять бизнес-процессы в облаке, а также программную и аппаратную инфраструктуру приложения, проходя через идея 'Все как услуга'. В тематических исследованиях программных решений, под-

держивающих BPM, было показано множество преимуществ [20, 21], как факторов улучшения качества обслуживания в eBPM.

#### **1.4. Методы исследования**

##### ***Гипотезы исследования***

На основе обзора литературы о бизнес-процессах в облачной среде были сформулированы следующие гипотезы исследования:

H1: Облачные решения влияют на развитие бизнес-процессов в области жизненного цикла проекта в контексте использования инструментов моделирования бизнес-процессов.

H2: Облачные решения влияют на развитие управления бизнес-процессами. В соответствии с гипотезами были сформулированы следующие исследовательские вопросы:

Вопрос 1: Какие области исследований/категории связаны с моделированием бизнес-процессов?

Вопрос 2: Какие поисковые фразы связаны с моделированием бизнес-процессов?

Вопрос 3: Какие области исследований/категории связаны с управлением бизнес-процессами?

Вопрос 4: Какие поисковые фразы связаны с управлением бизнес-процессами?

Дополнительные исследовательские вопросы были сформулированы в соответствии с характером исследования:

Вопрос 5: Каковы наиболее распространенные типы публикаций в источниках по соответствующим поисковым запросам? Вопрос 6: Какова текущая тенденция публикаций литературы, связанной с темой исследования, и когда эта тема вызвала наибольший интерес?

### ***Методология исследования***

Совершенствуется методология исследования, используемая в систематическом обзоре литературы. Предлагаемая методология исследования, основанная на систематическом обзоре литературы, была разработана с использованием научных баз данных Scopus, Web of Science и EBSCOhost Academic Search Ultimate. Для проведения данного исследования была адаптирована методика [1.1]. Существует несколько этапов методологии исследования, включая разработку проекта исследования, выбор доступной полнотекстовой научной базы данных, формулирование запросов и ограничение поиска, сбор данных и подготовку набора дат, оценку набора данных, обобщение и выводы.

Метод исследования был основан на обзоре литературы о бизнес-процессах в облачной среде. Систематический обзор литературы был разработан и проведен в контекст категорий научных областей облачных вычислений, моделирования бизнес-процессов и управления бизнес-процессами.

Набор данных был разработан на основе группы хорошо известных и наиболее цитируемых источников из литературных баз данных для исследователей и экспертов в изучаемой области, таких как Scopus, Web of Science и EBSCOhost.

Были предложены следующие ключевые слова для поиска: "BPaaS", "бизнес-процессы в облаке", "облачные бизнес-процессы", "эластичные бизнес-процессы", "eBPM".

Следующий шаг был основан на анализе запросов с использованием алгоритма поиска, а затем был проведен обзор набора данных. Набор данных был ограничен, а затем были проанализированы результаты исследования. Результаты исследования были обобщены и завершены.

### ***Результаты исследования***

Результаты исследования были основаны на результатах запросов,

основанных на наборе данных из Scopus, Web of Science и EBSCOhost. Результаты поиска представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Результаты поиска по базам данных

База данных	Ключевые слова и словосочетания	Число источников
Scopus	“BPaaS”	68
	“business process in cloud”	475
	“cloud based business processes”	286
	“elastic business processes”	207
	“eBPM”	5
		1041
Web of science	“BPaaS”	31
	“business process in cloud”	1662
	“cloud based business processes”	1030
	“elastic business processes”	79
	“eBPM”	3
		2805
EBSCOhost	“BPaaS”	3
	“business process in cloud”	46
	“cloud based business processes”	6
	“elastic business processes”	0
	“eBPM”	0
		55
Итого		3901

Количество статей и литературных источников было классифицировано по ключевым словам для поиска. Выбранные базы данных с источниками, ключевыми словами и количеством статей приведены в табл. 1.4. Ре-

зультаты исследования были представлены в 3901 статье: 1041 статье в Scopus, 2805 статья в Web of Science и 55 статья на EBSCOhost.

Гипотеза H1 может быть подтверждена результатами запроса, связанного с фразами "BPaaS", "бизнес-процессы в облаке" и "облачные бизнес-процессы". Ответы на исследовательские вопросы (RQ 1, RQ 2), связанные с гипотезой H1, указывают на существование соответствующих статей, проиндексированных во всех поисковых базах данных. Гипотеза H2 также может быть подтверждена результатами запроса (RQ 3, RQ 4), связанного с фразами "эластичные бизнес-процессы" и "eBPM".

Ограничения в поиске заключались в том, что предметная область была ограничена категорией компьютерных наук, а ключевые слова - облачными вычислениями, моделированием бизнес-процессов и управлением бизнес-процессами. Точные поисковые запросы были следующими.

Для базы данных Scopus:

TITLE-ABS-KEY(BPaaS) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA,"COMP"))

TITLE-ABS-KEY (business processes in cloud) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA,"COMP")) AND (LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Business Process"))

TITLE-ABS-KEY (cloud based business processes) AND (LIMIT-TO(SUB- JAREA,"COMP")) AND (LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Business Process"))

TITLE-ABS-KEY (elastic business processes) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA,"COMP"))

TITLE-ABS-KEY(eBPM) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA,"COMP"))

Для базы данных Web of Science:

TOPIC: (BPaaS): Refined by: WEB OF SCIENCE CATEGORIES: (COM- PUTER SCIENCE INFORMATION SYSTEMS OR COMPUTER SCIENCE THEORY METHODS OR COMPUTER SCIENCE SOFTWARE ENGINEERING OR COMPUTER SCIENCE INTERDISCIPLINARY

APPLICATIONS) Indexes = SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan = All years

TOPIC: (business process in cloud) Refined by: WEB OF SCIENCE CATEGORIES: (COMPUTER SCIENCE THEORY METHODS OR COMPUTER SCIENCE INFORMATION SYSTEMS OR COMPUTER SCIENCE SOFTWARE ENGINEERING OR COMPUTER SCIENCE INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS) Indexes = SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan = All years

TOPIC: (cloud based business processes) Refined by: WEB OF SCIENCE CATEGORIES: (COMPUTER SCIENCE INFORMATION SYSTEMS OR COMPUTER SCIENCE THEORY METHODS OR COMPUTER SCIENCE SOFTWARE ENGINEERING OR COMPUTER SCIENCE INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS) Indexes = SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan = All years

TOPIC: (elastic business processes) Refined by: WEB OF SCIENCE CATEGORIES: (COMPUTER SCIENCE THEORY METHODS OR COMPUTER SCIENCE INFORMATION SYSTEMS OR COMPUTER SCIENCE SOFTWARE ENGINEERING OR COMPUTER SCIENCE INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS) Indexes = SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan = All years

TOPIC: (eBPM) Refined by: WEB OF SCIENCE CATEGORIES: (COMPUTER SCIENCE INFORMATION SYSTEMS OR COMPUTER SCIENCE INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS) Indexes = SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED,

IC Timespan = All years.

Поисковые запросы для базы данных EBSCOhost не удалось экспортировать. Поисковый запрос в базе данных Web of Science по ключевым словам "бизнес-процесс в облаке" и "бизнес-процессы, основанные на облаке" дал множество различных результатов, поэтому он не был учтен. После удаления 445 повторяющихся записей между базами данных и ключевыми словами, количество статей, подлежащих окончательному отбору, составило 763. После ручного отбора оставшихся статей общее количество отобранных статей составило 313.

Процесс отбора основывался на следующих трех правилах:

1. были отклонены исследования, имеющие непосредственное отношение к управлению бизнес-процессами в облачной среде. Исследования, лишь частично относящиеся к обеим темам, например, облачная безопасность;

2. статьи на общую тему были отклонены, например, "32-я международная конференция по информационным системам 2011";

3. окончательное решение о приемлемости статьи было принято на основании названия.

Наиболее популярными типами публикаций являются материалы конференций (219 статей) и рефераты (77 статей), что является ответом на RQ5. Причинами такой популярности могут быть краткая форма публикаций такого рода со сравнением книг и другие более длинные и сложные формы публикаций, что в связи с новизной темы кажется понятным.

Моделирование бизнес-процессов является важной проблемой в организациях. Устранение "узких мест" и сбоев в работе процессов может повлиять на производительность организации и помочь в обеспечении надлежащего функционирования организации в целом и отдельных подразделений.

Облачные вычисления как технология, основанная на доступности

по запросу, представляется хорошей средой для моделирования бизнес-процессов.

Целью статьи было изучить современные тенденции в научной литературе, касающиеся облачной среды моделирования бизнес-процессов. Для достижения выбранной цели был проведен систематический обзор литературы. В ходе исследования были сформулированы гипотезы Н1 и Н2 о влиянии облачных решений на моделирование бизнес-процессов и управление бизнес-процессами, а также о точности результатов исследования. Гипотезы были проверены с помощью вопросов для исследования. Обе гипотезы Н1 и Н2 были положительно подтверждены по результатам обзора литературы и представлены в табл. 1.4. Описанное исследование имеет некоторые ограничения, поэтому дальнейшие исследования должны быть в большей степени направлены на демонстрацию современного состояния дел в этой области и влияния облачных вычислений на разработку инструментов моделирования в управлении ИТ-проектами.

### **1.5. Постановка задач работы**

**Целью работы** является разработка специальных средств управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ проблем управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

2. Разработать смешанную модель взаимосвязанных мультиагентных организационных систем, обеспечивающую устранение неопределенности моделирования совместно с отделением сбоя и помех (на уровне агентов) от кибератак (на уровне управления).

3. Создать формализацию свойства осознанности агентов мультиагентной организационной системы обеспечивающую получение оценки полноты осведомленности.

4. Предложить метод определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами, обеспечивающий минимизацию субъективности при классификации организационной системы по категориям зрелости и формирование обоснованной стратегии развития и повышения уровня зрелости.

5. Разработать методологию прогрессивного пакетирования работ в организационной системе, обеспечивающую формирование перечня рекомендаций по формированию взаимосвязанных пакетов и принципов по внутрипроектному взаимодействию участников.

6. Разработать архитектуру программной системы, обеспечивающую мониторинг отклонений, формирование иерархической структуры проектов и управление пользовательскими задачами.

## **Źródła k gawie 1**

- 1.1. Abideen, A.Z., et al.: Mitigation strategies to fight the COVID-19 pandemic—present, future and beyond. *J. Health Res.* 34(6), 1–17 (2020)
- 1.2. Ajmad, A., et al.: Event-driven process chain (EPC) for modeling and verification of business requirements – a systematic literature review. *IEEE Access* 6, 9027–9048 (2018)
- 1.3. ARIS Community. <https://www.ariscommunity.com/event-driven-process-chain>. Accessed 15 Nov 2020
- 1.4. Bitkowska, A.: Zarządzanie procesowe we współczesnych organizacjach. Difin, Warsaw (2013)
- 1.5. Business Process as a Service: the features of a good app. Heflo blog. <https://www.heflo.com/blog/bpm/business-process-as-a-service/>. Accessed 10 Nov 2020
- 1.6. Chomiak-Orsa, I., Kołtonowska, A.: Modelowanie procesów biznesowych z wykorzystaniem sieci Petriego i BPMN. Próba oceny metod. *Informatyka Ekonomiczna* 2(48), 9–18 (2018)
- 1.7. Dennis, A., Wixom, B.H., Tegarden, D.: *System Analysis & Design with UML Version 2.0. An Object-Oriented Approach*, 4th edn., p. 253. Wiley, Hoboken (2012)
- 1.8. Drejewicz, Sz.: *Zrozumieć BPMN. Modelowanie procesów biznesowych*, Helion, Gliwice (2012)
- 1.9. Gawin, B.: Modelowanie procesów biznesowych. In: Wrycza, S., Masłankowski, J. (eds.) *Informatyka Ekonomiczna. Teoria i zastosowania*. Polish Scientific Publishers, Warsaw (2019)
- 1.10. Gawin, B., Marcinkowski, B.: *Symulacja procesów biznesowych. Standardy BPMS i BPMN w praktyce*, Helion, Gliwice (2013)
- 1.11. Gzik, T.: Procesy biznesowe w chmurze obliczeniowej, *Zeszyty Naukowe Politechniki Czełchoyowskiej Zarządzanie* No. 31 (2018)
- 1.12. Jelonek, D., Stepiak, C., Turek, T., Ziara, L.: Identification of

mental barriers in the implementation of cloud computing in the SMEs in Poland. In: 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Warsaw, pp. 1251–1258 (2014)

1.13. Jelonek, D., Wysocka, E.: Barriers to the development of cloud computing adoption and usage in SMEs in Poland. *Adv. Inf. Sci. Appl.* 1, 128–133 (2014)

1.14. Jurek, J.: *Wdrożenia informatycznych systemów zarządzania*. Polish Scientific Publishers, Warsaw (2016)

1.15. Ko, R.K.L.: A computer scientist’s introductory guide to business process management (BPM). *Crossroads* 15(4), 11–18 (2009)

1.16. Mell, P., Grance, T.: The NIST definition of cloud computing, recommendations of the National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 800-145 (2011). <https://faculty.winthrop.edu/domanm/csci411/Handouts/NIST.pdf>. Accessed 30 Nov 2020

1.17. Morawiec, P., Sołtysik-Piorunkiewicz, A.: The new role of cloud technologies in management information systems implementation methodology. In: Arai, K., Kapoor, S., Bhatia, R. (eds.) *FTC 2020. AISC*, vol. 1290, pp. 423–441. Springer, Cham (2021). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63092-8\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63092-8_29)

1.18. OMG BPMN v2.0.1 Specification. <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.1/PDF>. Accessed 13 Nov 2020

1.19. Pasamonik, P.: Modelowanie procesów biznesowych zorientowane na czynnosćci. *Zesz. Nauk. WSInf* 9(2), 102–116 (2010)

1.20. Peterson, J.L.: *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs (1981)

1.21. Rosinosky, G., Labba, C., Ferme, V., Youcef, S., Charoy, F., Pautasso, C.: Evaluating multi-tenant live migrations effects on performance. In: Panetto, H., Debruyne, C., Proper, H.A., Ardagna, C.A., Roman, D., Meersman, R. (eds.) *OTM 2018. LNCS*, vol. 11229, pp. 61–77. Springer, Cham (2018).

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-02610-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02610-3_4)

1.22. Rosinosky, G., Youcef, S., Charoy, F.: An efficient approach for multitenant elastic business processes management in cloud computing environment. In: IEEE, pp. 311–318, June 2016

1.23. Rosinosky, G., Youcef, S., Charoy, F.: A genetic algorithm for cost-aware business processes execution in the cloud. In: Pahl, C., Vukovic, M., Yin, J., Yu, Qi. (eds.) ICSOC 2018. LNCS, vol. 11236, pp. 198–212. Springer, Cham (2018). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03596-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03596-9_13)

1.24. Schulte, S., Janiesch, Ch., Venugopal, S., Weber, I., Hoenisch, P.: Elastic business process management: state of the art and open challenges for BPM in the cloud. *Future Gen. Comput. Syst.* 46, 36–50 (2015)

Sommerville, I.: *Software Engineering*, 9th edn., pp. 135–136. Addison-Wesley, Boston (2010)

## **2. Управляемая событиями совместная стабилизация много-агентных систем с частично неизвестной взаимосвязанной динамикой**

### **2.1. Проблема стабилизации во взаимосвязанных многоагентных организационных системах**

Рассматривается проблема стабилизации во взаимосвязанных многоагентных организационных системах, подверженных как согласованным, так и несогласованным неопределенностям моделирования. Предлагается смешанная теория графов и формулировка оптимального управления, создается двухуровневая структура с отдельными уровнями агентов и управления и учитывается архитектурный аспект организационных систем. Уровень управления, который должен быть спроектирован, представляет собой линейную стратегию совместного управления и строится с помощью управляющих узлов, коммуникационного протокола и стратегий трансляции информации, запускаемых событиями. Мы предлагаем систематическую структуру проектирования для получения двух надежных статистических преимуществ, позволяющих использовать одну и ту же реализацию уровня управления как для согласованных, так и для несогласованных неопределенностей моделирования. В предлагаемой стратегии, основанной на событиях, каждый агент использует только два несвязанных импульсных аппроксиматора для определения событий, связанных с передачей информации, независимо от других агентов. Мы доказываем экспоненциальную сходимость к началу координат всех траекторий предлагаемой двухуровневой взаимосвязанной многоагентной системы в рамках линейных кооперативных протоколов; свободен от поведения Zeno, несмотря на частично известные нелинейности на уровне агентов и несинхронную, непериодическую связь на уровне управления. Мы также изучаем практическую стабильность с помощью Zeno-freeness, чтобы снизить чувствительность стратегии, запускаемой событиями, к помехам, или количество событий,

передающих информацию. Мы проверяем осуществимость наших идей при моделировании.

Организационным системам (CPS) уделяется значительное внимание среди политиков и исследователей [2.3]. С точки зрения управления, в то время как литература, посвященная крупномасштабным системам, сосредоточена на разработке простых и эффективных инструментов анализа и проектирования для динамически взаимосвязанных подсистем, основное внимание в CPS уделяется использованию встроенных сенсорных, коммуникационных и вычислительных технологий. В частности, использование (беспроводных) коммуникационных технологий поднимает ряд новых проблем в дополнение к проблемам традиционно управляемых систем, которые должны быть решены разработчиком системы управления [2.6]. Мы упоминаем энергоэффективность и атаки в качестве примеров киберпроблем, а неопределенности моделирования, сбои и помехи - в качестве физических отклонений.

По нашему мнению, для эффективной формулировки и решения множества вышеупомянутых проблем как для одно-, так и для многоагентных CPS требуется новая структура проектирования управления. Мы рассматриваем класс взаимосвязанных систем MAS, подверженных согласованным или несогласованным неопределенностям моделирования как на уровне агентов, так и на уровне MAS. Мы предлагаем теоретико-графовый подход к (1) моделированию взаимодействия между динамиками агентов на уровне агентов, который соответствует физическому уровню CPS, и (2) разработке протокола распределенной стабилизации на основе связи на уровне управления, который напоминает киберуровень CPS. Эта двухуровневая структура позволяет нам отразить архитектурный аспект CPS для взаимосвязанных систем массового обслуживания и, следовательно, систематически решать вышеупомянутые задачи, связанные с управлением. В частности, мы используем подход к оптимальному управлению, что-

бы устранить влияние неопределенностей моделирования на агентском или физическом уровне, и подход к планированию связи, инициируемый событиями, для эффективного использования ограниченных энергетических ресурсов управляющего или кибернетического уровня. Предлагаемый подход к оптимальному управлению подробно описан в двух модифицированных задачах линейного квадратичного регулирования, по одной для каждого из сценариев неопределенности моделирования. Стратегия каждого агента, основанная на событии (ETS), отличается от стратегии других агентов и формулируется с использованием не более двух несвязанных импульсных аппроксиматоров. Для каждой из конечных двухслойных (замкнутых) взаимосвязанных MAS мы доказываем экспоненциальную сходимость всех траекторий состояний к началу координат или к окрестности начала координат. В любом случае, мы проводим дополнительные исследования без использования Zeno, чтобы убедиться в осуществимости наших теоретических идей в смысле снижения энергопотребления. Мы подтверждаем эти идеи с помощью двух имитационных исследований.

После краткого обзора литературы мы вводим математические обозначения и определения, связанные с графами (раздел 2.2), формулируем задачу кооперативной стабилизации и предлагаем основные результаты (раздел 2.3), исследуем их при моделировании (раздел 2.4) и подводим итоги исследования (раздел 2.5).

Теоретико-графовые подходы были успешно использованы для достижения консенсуса в массовом порядке. В то время как первоначальные исследования были в основном сосредоточены на простом MAS с агентами-интеграторами для построения связи между теорией графов и системами управления, недавно были изучены более сложные агентные модели с неопределенностями моделирования на уровне агентов [2.1] или полностью известные взаимосвязанные агенты [2.24, 2.27, 2.36]. Параллельно с этими усилиями в работе [2.33] была предложена концепция многоуровне-

вого распределенного управления, основанная на теории графов, и обсуждалось ее потенциальное применение в национальной энергетической системе. В [2.14] математически сформулирована стратегия анализа для MAS взаимосвязанных агентов-интеграторов. Однако надежность в отношении неопределенностей на этих уровнях не обсуждалась [2.10]. Такое рассмотрение важно для надежной работы в условиях различных физических и кибернетических аномалий [2.6]. Кроме того, в долгосрочной перспективе многоуровневая распределенная система управления может быть использована для анализа и синтеза взаимозависимых сетей, которые будут рассматриваться как следующее поколение инженерных систем управления (CPS) [2.11].

В качестве попытки справиться с неопределенностями моделирования в [2.30] был предложен алгоритм распределенной развязки для стабилизации взаимосвязанной массы, подверженной частично неизвестной динамике агентов, с согласованными или несогласованными неопределенностями моделирования. Надежные преимущества локального управления разработаны с использованием формулировок малой размерности. Однако результат ограничен локально (несвязанными) стабильными агентами и полностью известной топологией межсоединений. Уделяя особое внимание проектированию топологии уровня управления и не прибегая к проектированию локального усиления управления, в работе [2.32] была предложена задача проектирования уровня управления для взаимосвязанной массы с неизвестными топологиями взаимосвязей. Этот метод позволяет охватить архитектурный аспект CPS, поскольку уровень управления полностью отличается от неизвестной топологии взаимодействия на уровне агентов. Однако этот подход к решению ограничен взаимосвязанной массой с динамикой агентов первого и второго порядка. Кроме того, для этого требуется непрерывная связь между контроллерами на уровне управления, что может поставить под угрозу его использование для взаимосвязанных сис-

тем с беспроводной связью и ограниченными энергетическими ресурсами. В [2.31] повторно исследована та же проблема, основанная на подходе к проектированию с дискретным временем. Хотя это расширение может допускать прерывистую связь для взаимосвязанных агентов первого и второго порядка, выборка является периодической и должна продолжаться даже после достижения контрольной цели. Кроме того, все моменты выборки агентов должны быть синхронизированы. В качестве основного недостатка исследования с дискретным временем, по сравнению с его альтернативой проектирования с непрерывным временем [2.32], наличие взаимосвязанных неопределенностей моделирования снижает гибкость при проектировании (или выборе) топологий уровня управления, когда порядок динамики агентов увеличивается до двух (и более двух, как будет показано ниже, см. раздел 2.3).

Основываясь на приведенном выше наблюдении о конструкциях с непрерывным и дискретным временем, в работе [2.29] была разработана ETS для стабилизации взаимосвязанной массы с учетом соответствующих погрешностей моделирования. Этот метод основан на подходе к проектированию в непрерывном режиме времени; однако в качестве механизма запуска он использует множество удержаний нулевого порядка. Известно, что аппроксиматоры импульсных систем могут уменьшить количество запускающих событий по сравнению с аппроксиматорами с нулевым порядком, поскольку они могут лучше оценивать внутренние состояния агентов. В [2.2] была предложена такая идея для достижения консенсуса в сети полностью известных несвязанных между собой линейно-инвариантных по времени (LTI) агентов. Этот метод ограничен LTI MAS с матрицей распределения входных данных для управления идентификацией, и каждый агент должен быть оснащен  $|N_i|+1$  импульсными аппроксиматорами, где  $|N_i|$  обозначает мощность  $i$ -го узла. В работе [2.23] предложена другая ETS для решения проблемы консенсуса в несвязанной массе LTI, использующая

только два импульсных аппроксиматора для каждого агента. Однако они связаны друг с другом динамикой скачков, и сигнал об ошибке (который должен быть получен через систему связи в окрестностях агентов) повторно передается соседям. Это может снизить скорость вычислений контроллеров для вычисления и отправки соответствующих управляющих команд агентам.

Рассмотренная в работе проблема стабилизации имеет некоторые общие черты со следующими исследованиями. В работе [2.34] был сделан интересный начальный шаг по созданию основы для управления с помощью событий с точки зрения крупномасштабной системы [2.25]. Согласно этому подходу, динамика и топология межсоединений известны априори, эффект физического взаимодействия измеряется для использования соответствующим контроллером, и нет четкого обсуждения возможности Zeno-freeness. В работе [2.38] стабилизирована полностью известная взаимосвязанная система LTI с точки зрения сетевого управления. Чтобы получить преимущества локальной стабилизации, используя малоразмерную конструкцию, компоненты межсоединений удовлетворяют условию соответствия, а топология связи сетевых контроллеров идентична полностью известной топологии межсоединений между подсистемами. Следовательно, этот метод не отражает архитектурный аспект CPS. Основываясь на концепции диагонального доминирования в системах с несколькими входами и несколькими выходами, в работе [2.19] был проанализирован эффект несовершенной развязки, когда вышеупомянутое условие согласования не может быть выполнено полностью. Однако процедура проектирования основана на тех же допущениях, что и в работе [2.38].

В работе [2.37] было смягчено условие согласования и обнаружено, что задача стабилизации, вызванная событием, может быть решена как для нелинейных, так и для линейных систем, если динамика подсистем и топология взаимосвязей полностью известны. Для линейного сценария авторы

дополнительно сформулировали подход к проектированию, используя набор линейных матричных неравенств (LMI). Размерность этих LMI зависит от размера взаимосвязанной системы (из-за ослабления условия согласования) теоретически невозможно гарантировать отсутствие Zeno вблизи источника (из-за выбора ETS). С точки зрения теории графов, в работе [2.8] был разработан распределенный консенсусный протокол лидер-последователь для взаимосвязанной MAS с непревзойденными неопределенностями структурированного моделирования. Чтобы получить локальный консенсусный результат, необходимо одновременно решить набор LMI большого размера, в зависимости от полностью известной базовой топологии межсоединений. Кроме того, для реализации этой ETS все подписчики должны иметь доступ к информации о лидере. Мы также отмечаем работу [2.13] как продолжение [2.12], запускаемое событиями. Обсуждается анализ устойчивости нелинейно взаимосвязанных систем от входа к состоянию, в котором для каждого агента переменная состояния каждого соседа выступает в качестве внешнего входного сигнала. Однако сложно предложить (малоразмерное) конструктивное решение для стабилизации произвольно взаимосвязанной системы, вызванной событием (см. замечание 1 в [2.13]).

Сосредоточившись только на механизмах запуска, мы отмечаем, что в [2.34, 2.37, 2.38] были предложены цифровые подходы с нулевым порядком хранения, позволяющие просто сохранять постоянное значение последней поступившей информации, а в [2.2] разработан импульсивный системный подход для оценки возможных изменений в последней поступившей информации о ценности каждого агента (в разомкнутом виде). Механизмы запуска событий также могут быть классифицированы на основе их постоянных [2.34], зависящих от состояния [2.38], смешанных постоянных и зависящих от состояния [2.16], смешанных постоянных и зависящих от времени [2.2] и смешанных пороговых функций, зависящих от

состояния и времени [2.40]. Во всех случаях обратите внимание, что необходимо обеспечить бесперебойность пускового механизма, чтобы гарантировать осуществимость предлагаемой стратегии. Согласно литературе, это может быть сложной задачей в теоретико-графовых распределенных подходах для массового использования (например, обсуждение в [2.16, 2.35]). Мы обращаемся к обзорным статьям [2.7, 2.17, 2.20] для получения полного списка недавних публикаций по этому вопросу.

## 2.2. Используемые инструменты

В работе мы следуем стандартным обозначениям.  $\mathbb{R}^+$  обозначает набор неотрицательных вещественнозначных скаляров,  $\mathbb{Z}^+$  - набор положительных целых чисел,  $\mathbf{0}$  - матрица всех нулей соответствующей размерности,  $\text{diag}\{.\}$  - диагональная матрица (блочная) элементов в  $\{.\}$ ,  $\text{col}\{x_i\}$  - агрегированный вектор-столбец  $x_i$  для всех  $i$ ,  $|N|$  мощность множества  $N$  и  $\|\cdot\|$  - 2-норма вектора или индуцированная 2-норма матрицы, заданная в качестве его входного аргумента. Далее,  $A \mathbf{f} B$  ( $\bar{V} \mathbf{f} 0$ ) означает, что матрица  $A-B \in \mathbb{R}^{n \times n}$  (скалярная функция  $\bar{V}$ ) является положительно определенной. Аналогично,  $\mathbf{f}$  представляет собой положительную полуопределенность. Неравенство

$$-2x^T y \leq ax^T x + \frac{1}{a} y^T y$$

выполняется для всех векторов  $x, y \in \mathbb{R}^n$  и положительного скаляра  $a$ , который будет использоваться при доказательстве стабильности в разделе 2.3.

Мы рассмотрим две топологии графов, чтобы охватить архитектурный аспект CPS с разделением физического и киберуровня: граф уровня агентов  $G_a$  представляет взаимодействие динамики агентов на физическом уровне CPS, а граф уровня управления  $G_c$  - поток информации между контроллерами на киберуровне CPS. Мы допускаем существование замкнутых циклов на обоих уровнях, где с помощью замкнутого цикла мы ссылаемся на ребро, исходящее из одного и того же узла и возвращающееся к нему,

не проходя через какие-либо другие узлы. Поскольку стандартные определения матриц смежности и Лапласа не допускают самопроизвольных циклов [2.26], мы переопределяем их в остальной части этого раздела.

Граф  $G_a$  уровня агентов с  $N$  узлами характеризуется модифицированной матрицей смежности  $A_a=[a_{ij}^a] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ , где  $a_{ij}^a$  равно 0, если на  $i$ -го агента влияет динамика  $j$ -го агента для  $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ , и в противном случае  $a_{ij}^a \neq 0$ . В отличие от стандартного определения, допустимо значение  $j=i$ , а  $a_{ij}^a$  представляет собой действительный скаляр с положительным или отрицательным знаком.  $N_i^a$  обозначает набор соседей  $i$ -го агента по  $G_a$  и, возможно, включает индекс  $i$  (петля).

Граф управляющего уровня  $G_c$  с  $N$  узлами характеризуется модифицированной матрицей Лапласа  $H_c=L_c+S_c \in \mathbb{R}^{N \times N}$ .  $L_c \in \mathbb{R}^{N \times N}$  – это стандартная матрица Лапласа неориентированного  $G_c'$ , полученная путем удаления всех петель:  $L_{ij}^c = -a_{ij}^c$  и  $L_{ii}^c = \sum_{j \in N_i^c} a_{ij}^c$  с положительными весами ребер  $a_{ij}^c$ .  $N_i^c$  характеризует набор соседей  $i$ -го контроллера по  $G_c$ , исключая число  $i$  (петля).  $S_c = \text{diag}\{s_i^c\}$ ,  $\mathbb{R}^{N \times N}$  - диагональная матрица, представляющая автоциклы:  $s_i^c > 0$ , когда вокруг  $i$ -го контроллера имеется петля, и  $s_i^c = 0$  в противном случае. Все собственные значения  $H_c$  являются строго положительными вещественнозначными скалярами, которые должны быть отсортированы как  $0 < \mu_{c1} \leq \mu_{c2} \leq \dots \leq \mu_{cN}$  [2.31].

Как  $G_a$ , так и  $G_c$  могут быть отключены; однако в каждом подключенном компоненте на уровне управления  $G_c$  имеется по крайней мере одна петля. Мы предполагаем, что владелец уровня агента использует только  $\|A_a\|$  для доступа к уровню управления, разработанному таким образом, что, возможно, намеренно, подробная информация о топологии межсоединений уровня агента остается конфиденциальной. В разделе 2.3 мы используем  $G_c$  (и  $H_c$ ) в качестве степени свободы проектирования.

### 2.3. Взаимосвязанные мультиагентные системы

Мы рассматриваем следующие взаимосвязанные мультиагентные системы:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t) + y_i(z_i(t), t) \\ z_i(t) &= C_{z_i} \hat{a} \mathop{\textcircled{a}}_{j \in N_i^a} a_{ij}^a x_j(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $x_i \in \mathbb{R}^{n_x}$  обозначает переменную состояния  $i$ -го агента, управляющий вход и переменную взаимосвязи. Известная пара системных матриц  $(A, B)$  является стабилизируемой. Положительный скаляр  $\|A_a\|$  используется совместно с разработчиком уровня управления; однако топология уровня агента  $G_a$  остается конфиденциальной (как структура, так и веса ребер). Эта модель охватывает неопределенности моделирования либо на уровне агента (только  $a_{ii}^a \neq 0$  для агента  $i$ ), либо на уровне MAS (где некоторые  $a_{ij}^a \neq 0$ , где  $j \neq i$ ). В зависимости от нелинейных функций  $y_i : \mathbb{R}^{n_z} \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{n_x}$  матриц распределения взаимосвязей  $C_{z_i}$  могут возникнуть два случая: несогласованный сценарий  $\psi_i = V_f f_i(z_i)$ , когда  $\psi_i$  (и  $V_f$ ) не находятся в диапазоне  $B$ , и согласованный сценарий  $\psi_i = V_g g_i(y_i)$ , когда  $\psi_i$  находится в диапазоне  $B$ . Первое означает, что неопределенности моделирования могут быть связаны с внутренней динамикой агентов, но не со стороны исполнителя, как в случае со вторым сценарием. Эти подробные модели представлены в разделах 2.3.1 и 2.3.2 соответственно.

*Цель:* При наличии взаимосвязанных неопределенностей нелинейного моделирования на уровне агентов обеспечить надежную экспоненциальную сходимость всех траекторий к началу координат:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = 0 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2.2)$$

используя неперiodическую, несинхронную передачу информации в окрестности контроллеров на уровне управления  $G_c$ .

С этой целью мы оснащаем каждую пару агентов-контроллеров двумя подсистемами импульсной аппроксимации и реализуем следующий

протокол статической линейной совместной стабилизации:

$$u_i(t) = K(L_{ii}^c \hat{x}_i(t) - \hat{x}_g^i(t) + s_i^c \hat{x}_i(t)) \quad (2.3)$$

где  $K \in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$  обозначает статическую матрицу усиления управления, которая должна быть разработана, а  $L_{ii}^c$  и  $s_i^c$  определены в разделе 2.2.

Первый (авто) импульсный аппроксиматор генерирует  $\hat{x}_i \in \mathbb{R}^{n_x}$  в качестве оценки переменной состояния  $i$ -го агента  $x_i$ :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) &= A\hat{x}_i(t), \quad t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \\ \hat{x}_i(t) &= x_i^-, \quad t = t_k^i \end{aligned} \quad (2.4)$$

чтобы запуститься в последовательности событий  $\{t_k^i\}$   $i$ -го контроллера, где  $t_0^i = 0$ ,  $k \in \mathbb{Z}^+$ , и

$$x_i^- = \lim_{t \rightarrow t_k^i} x_i(t)$$

то есть мы рассматриваем предел с левой стороны, потому что  $t_k^i$  - точка разрыва в  $x_i(t)$ . Далее, следующий сосредоточенный импульсный аппроксиматор дает  $\hat{x}_g^i \in \mathbb{R}^{n_x}$  в качестве оценки накопленной переменной состояния  $x_g^i = \mathring{a}_{j \in N_i^c} x_j^i$ , где  $N_i^c$  обозначает соседний набор  $i$ -го контроллера на уровне

управления  $G_c$ , а  $x_j^i$  - информацию  $j$ -го агента, которая может быть получена агентом  $i$  при установке непрерывной связи:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_g^i(t) &= A\hat{x}_g^i(t), \quad t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \\ \hat{x}_g^i(t) &= x_g^{i-}, \quad t = t_k^i \end{aligned} \quad (2.5)$$

запускается в последовательности времен событий  $\{t_k^j\}$  соседей  $i$ -го контроллера  $j \in N_i^c$ , т.е. в объединении  $\mathring{E}_{j \in N_i^c} \{t_k^j\}$ . Также,

$$t_0^j = 0,$$

$$x_g^{i-} = \mathring{a}_{j \in N_i^c} x_j^-,$$

$$x_i^- = \lim_{t \rightarrow t_k^i} x_i(t).$$

Наконец, мы позволяем событиям информационной трансляции  $i$ -го

агента автоматически генерироваться следующими ETS:

$$t_{k+1}^i = \inf \left\{ t > t_k^i, t_0^i = 0 \mid a_{0i} + a_{1i} e^{-b_i t} \mathbf{1} \left\| e_i(t) \right\|^2 \right\} \quad (2.6)$$

где  $\{t_k^i\}$  обозначает временную последовательность запуска  $i$ -го агента для  $k \in \mathbb{Z}^+$  и  $t_0^i = 0$ , а другие параметры будут соответственно определены в разделах 2.3.1 и 2.3.2.

**Замечание 1** (Энергосбережение). По сравнению со стратегиями, не основанными на ETS, приведенная выше реализация (2.3)-(2.6), по-видимому, увеличивает затраты на локальные вычисления. Однако в [2.39] упомянуто, что потребление энергии локальными системами обработки меньше, чем при передаче данных по сетям. Далее, в [2.28], делается вывод о том, что стратегии неперiodической выборки могут потреблять на 80% меньше энергии по сравнению с периодическими методами. В предлагаемом способе, поскольку каждый агент определяет свои запускающие события независимо от других агентов, неперiodическая и несинхронная по расписанию (прерывистая) связь может значительно снизить энергопотребление уровня управления. Это представляет интерес для CPS с ограниченными энергетическими ресурсами. В качестве преимущества предложенной теоретико-графовой формулировки (2.3) мы можем также сформулировать надежную конфигурацию децентрализованного управления только с  $N$  импульсными аппроксиматорами (2.4), когда все  $N_i^c = \mathcal{AE}$  и  $s_i^c > 0$ . Также возможно сочетание совместной и децентрализованной конфигурации, при которой каждый децентрализованный узел управления использует только один аппроксиматор (2.4). Это может помочь достичь компромисса между затратами на локальную обработку и обмен данными между контроллерами.

Ключевая проблема заключается в том, что один и тот же уровень управления, созданный в соответствии с протоколами (2.3)–(2.6), должен использоваться как для несогласованных, так и для согласованных сцена-

риев. Это тема следующих двух подразделов. Другая проблема заключается в том, чтобы избежать феномена Zeno при наличии неопределенностей моделирования. С теоретической точки зрения, основанной на литературе по гибридным системам [2.18], требуется свобода от Zeno, чтобы гарантировать полноту для всех траекторий предлагаемого двухслойного MAS. С практической точки зрения, по сравнению со связанными сценариями непрерывной связи, Zeno-freeness помогает снизить энергопотребление за счет прерывистого обмена информацией на уровне управления [2.39].

Теперь мы упростим вышеупомянутый реализованный контроллер для удобства анализа. В частности, обратите внимание, что каналы связи свободны от задержек и кибератак. Следовательно, каждый  $j$ -й импульсный аппроксиматор, т.е. (2.4) с изменением индекса с  $i$  на  $j$ , испытывает скачок при  $t=t_k^j$ , который является одинаковым для всех объединенных импульсных аппроксиматоров (2.5), связанных с  $j$ -м агентом (т.е. всех  $|N_j^c|$  аппроксиматоров  $j$ -х соседей агента). Следовательно, мы определяем

$$\hat{x}_g = \hat{x}_g^i = \underset{j \in N_i^c}{\mathring{a}} \hat{x}_j = \underset{j \in N_i^c}{\mathring{a}} \hat{x}_j^i$$

и перепишем (2.3) следующим образом:

$$u_i(t) = K \left( L_{ii}^c \hat{x}_i(t) - \hat{x}_g(t) + s_i^c \hat{x}_i(t) \right). \quad (2.7)$$

### 2.3.1. Непарный сценарий

Теперь мы сосредоточимся на мультиагентной системе со следующими агентами:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t) + B_f f_i(z_i(t), t) \\ z_i(t) &= C_{z_i} \underset{j \in N_i^a}{\mathring{a}} a_{ij}^a x_j(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

с непарными погрешностями моделирования. Здесь  $z_i \in \mathbb{R}^{n_z}$  обозначает переменную взаимосвязи  $i$ -го агента,  $B_f \in \mathbb{R}^{n_x \times n_f}$  матрицу распределения непарных взаимосвязей (не в диапазоне  $B$ ) и  $C_{z_i} \in \mathbb{R}^{n_z \times n_x}$  - неизвестную мат-

рицу взаимосвязей, удовлетворяющую  $\|C_{z_i}\| \leq \gamma_{ci}$ , где  $\gamma_c = \max\{\gamma_{ci}\} \in \mathbb{R}^+$  является известным скаляром для разработчика уровня управления. Известные нелинейные функции

$$f_i: \mathbb{R}^{nz} \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{nf}$$

являются кусочно-непрерывными во времени и липшицевыми на  $\mathbb{R}^{nz}$ , обеспечивая существование и единственность решения нелинейного дифференциального уравнения (2.8) (раздел 3.1 в [2.21]). Однако эти константы Липшица неизвестны разработчику управляющего слоя, и вместо этого мы принимаем поточечные неравенства

$$f_i^T(z_i, t)f_i(z_i, t) \leq \gamma_{fi} z_i^T z_i$$

удовлетворяющие известному скаляру

$$\gamma_f = \max_i \{\gamma_{fi}\} \in \mathbb{R}^+.$$

Предполагается, что известна только  $\gamma_f$ ; следовательно, по сравнению с константами Липшица, которые должны быть известны для всех пар точек в пространстве состояний, это предположение является более мягким и может привести к теоретически менее консервативным выводам.

Упрощенный протокол взаимодействия (2.7) может быть переписан в виде

$$\dot{u}_i = K_{\xi} \sum_{j \in N_i^c} \alpha_{ij} (\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t)) + s_i^c \hat{x}_i(t) \ddot{\emptyset}.$$

Мы определяем локальную (импульсную) ошибку аппроксимации  $e_i @ \hat{x}_i - x_i$  для  $i$ -го агента и находим взаимосвязанные агенты с замкнутым контуром

$$\dot{x}_i = Ax_i + BK_{\xi} \sum_{j \in N_i^c} \alpha_{ij} (x_i - x_j) + s_i^c x_i \ddot{\emptyset} + BK_{\xi} \sum_{j \in N_i^c} \alpha_{ij} (e_i - e_j) + s_i^c e_i \ddot{\emptyset} + B_f f_i(z_i)$$

агрегирование которых по  $G_a$  и  $G_c$  приводит к получению следующих двухслойных взаимосвязанных MAS:

$$\begin{aligned} & \text{Номинальная динамика} \quad \text{Ошибка переключения} \quad \text{Взаимодействие} \\ & \dot{x} = \bar{A}x + (H_c \ddot{A} BK)x + (H_c \ddot{A} BK)e + \bar{B}_f f(z) \quad (2.9) \\ & z = C_z (A_a \ddot{A} I_{n_x})x \end{aligned}$$

где  $\bar{A} = I_N \ddot{A} A$ ,  $\bar{B}_f = I_N \ddot{A} B_f$ ,  $z = \text{col}\{z_i\}$ ,  $C_z = \text{diag}\{C_{z_i}\}$ ,  $x = \text{col}\{x_i\}$ ,  $e = \text{col}\{e_i\}$ , и  $f = \text{col}\{f_i\}$ .

**Замечание 2.** Двухслойная взаимосвязанная система MAS (2.9) имеет управляющий слой  $G_c$ , который должен быть спроектирован, топология которого может полностью отличаться от неизвестной топологии  $G_a$  уровня агента. Таким образом, смешанное оптимальное управление и теоретико-графовая формулировка позволяет нам систематически охватывать архитектурный аспект CPS через уровни управления и агентов.

Напоминая, что  $\mu_{c1} > 0$  является наименьшим положительным собственным значением модифицированной матрицы Лапласа  $H_c$ , мы добавляем и вычитаем  $\mu_{c1} (I_n \ddot{A} BK)x$  из номинальной динамики в (2.9) и переписываем следующим образом:

$$\begin{aligned} & \text{Сетевая номинальная динамика} \quad \text{Неопределенность, вызванная сетью} \\ & \dot{x} = \bar{A}x + \bar{B}v + \bar{B}\bar{E}v \quad (2.10) \end{aligned}$$

где

$$\bar{B} = I_N \ddot{A} \mu_{c1} B,$$

$$\bar{E} = E \ddot{A} I_{N_u} \mathbf{f} 0,$$

$$E = \frac{H_c}{\mu_{c1}} - I_N \mathbf{f} 0,$$

При этом  $v = \text{col}\{v_i\} = \bar{K}x = (I_N \ddot{A} K)x$  есть агрегированный (несвязанный) сигнал стабилизации, который следует учитывать при проектировании. Обратите внимание, что в “сетевой” номинальной динамике основное внимание уделяется наличию  $\mu_{c1}$  в  $\bar{B}$ , чтобы отличить эту модель от номинальной (несвязанной) части (2.8).

Мы вводим вспомогательную (малоразмерную) сетевую номиналь-

ную систему, которая вместе с декомпозицией в (2.10) позволяет нам преодолеть необходимость в многомерном подходе к проектированию в исследуемом сценарии (в отличие от подходов [2.8, 2.38]):

$$\dot{x}'_i = Ax'_i + m_{c1} Bv'_i + B_f w'_i \quad (2.11)$$

Здесь  $v'_i = Kx'_i \hat{I} \in R^{n_u}$  определяется в (2.10) и  $v'_i = Kx'_i \hat{I} \in R^{n_u}$ ,  $F \hat{I} \in R^{n_r \times n_x}$ , является виртуальным управляющим сигналом для устранения влияния взаимосвязанных нелинейностей  $f_i$  в (8). Мы также вводим (локальную) функцию затрат:

$$J(x'_i(t)) = \int_t^{\infty} (x'^T_i(t) Q_f x'_i(t) + v'^T_i(t) R v'_i(t) + w'^T_i(t) W w'_i(t)) dt$$

где  $Q_f = Q + W_f$  - модифицированная взвешенная матрица состояний, а  $Q \hat{I} \in R^{n_x \times n_x}$ ,  $R \hat{I} \in R^{n_u \times n_u}$ ,  $W \hat{I} \in R^{n_r \times n_r}$  - три расчетные матрицы. В дальнейшем,

$$W_f = g_f g_c \max(W) \|A_a\|^2 I_{n_x}$$

удовлетворяет следующему неравенству (для агрегированных переменных  $f$  и  $x$ ):

$$f^T(z') \bar{W} f(z') \leq x'^T \bar{W}_f x' \quad (2.12)$$

где

$$\bar{W} = I_N \ddot{A} W$$

$$\bar{W}_f = I_N \ddot{A} W_f$$

$$z' = C_z (A_a \ddot{A} I_{n_x}) x'$$

$$x' = \text{col}\{x'_i\}.$$

Теперь мы предлагаем малоразмерную проектную задачу для непарного сценария.

Пусть  $C_i$  - набор всех допустимых (со статической линейной обратной связью по состоянию) стабилизирующих управляющих сигналов  $v'_i$  и  $w'_i$  для номинальной динамики вспомогательной сети (2.11). Тогда решение следующей **модифицированной задачи LQR 1 (mLQR)** дает потенци-

альное усиление управления  $K$  и фиктивное усиление  $F$ , когда выполняется (2.13):

$$V(x_i'(0)) = \min_{v_i, w_i^1 \in E_i} J(x_i'(0))$$

при условии соблюдения (2.11)

$$Q_{um} = Q + K^T R K - 2F^T W F \mathbf{f} 0 \quad (2.13)$$

Индекс “um” в  $Q_{um}$  указывает на исследуемый сценарий. Слово “модифицированный” в формулировке mLQR указывает на требуемую модификацию матрицы взвешивания состояний  $Q_f$ , несмотря на то, что все  $Q$ ,  $R$  и  $W$  остаются в качестве (настраиваемых) проектных степеней свободы, и на тот факт, что этот mLQR решается с помощью вспомогательной сетевой номинальной системы. Мы подчеркиваем, что фиктивное усиление  $F$  не реализовано в (2.3). Оно используется исключительно в условии (2.13) для определения того, может ли  $K$  быть потенциальным стабилизирующим усилением для учета эффекта несопоставимых взаимосвязанных нелинейностей  $f_i$  на уровне агентов или нет. Аналитически мы знаем, что  $K$  и  $F$  получены с использованием решения  $P \mathbf{f} 0$  алгебраического уравнения Риккати (ARE) следующим образом:

$$\begin{aligned} A^T P + P A + Q_f - P (\mu_{c1}^2 B R^{-1} B^T + B_f^T W^{-1} B_f) P &= 0 \\ K &= -\mu_{c1} R^{-1} B^T P \\ F &= -W^{-1} B_f^T P \end{aligned} \quad (2.14)$$

Существование и единственность  $P \mathbf{f} 0$  обеспечиваются наблюдаемостью и стабилизируемостью  $(Q_f^{1/2}, A, [\mu_{c1} B, B_f])$ , где  $Q_f^{T/2} Q_f^{1/2} = Q_f$  [2.21]. Мы также отмечаем, что  $(A, [\mu_{c1} B, B_f])$  является стабилизируемым, потому что  $(A, B)$  является стабилизируемым, а  $\mu_{c1}$  - положительным скаляром, и  $Q_f = Q + W_f \mathbf{f} 0$  потому, что  $Q$  и  $W_f$  - две положительно определенные матрицы.

Мы суммируем равенства в (14), чтобы найти

$$\begin{aligned}
I_N \ddot{A} (A^T P + PA + Q_f - P(m_{\ell 1}^2 BR^{-1}B^T + B_f^T W^{-1}B_f)P) &= 0 \\
I_N \ddot{A} (K + m_{\ell 1} R^{-1}B^T P) &= 0 \\
I_N \ddot{A} (F + W^{-1}B_f^T P) &= 0
\end{aligned}$$

Мы предварительно и после умножаем первое агрегированное равенство на  $x'$ , а затем все их умножаем на  $x$ , чтобы найти следующие равенства, основанные на сигналах, известные как условия оптимальности в литературе по оптимальному управлению [2.22].

### Конструктивные свойства 1.

Совокупная масса замкнутых контуров MAS номинальной динамики вспомогательной сети (2.11) с  $v = \bar{K}x$  и  $w = \bar{F}x$  задачи 1 удовлетворяет следующим равенствам:

$$\begin{aligned}
x^T \bar{Q}_f x + v^T \bar{R} v + w^T \bar{W} w + \bar{V}_x^T (\bar{A}x + \bar{B}v + \bar{B}_f w) &= 0 \\
2v^T \bar{R} + \bar{V}_x^T \bar{B} &= 0 \\
2w^T \bar{W} + \bar{V}_x^T \bar{B}_f &= 0
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
v &= \bar{K}x, \\
w &= \text{col}\{w_i\} = (I_N \ddot{A} F)x = \bar{F}x \\
\bar{Q}_f &= I_N \ddot{A} Q_f \\
\bar{R} &= I_N \ddot{A} R \\
\bar{V}_x &= \frac{\nabla \bar{V}}{\nabla x} \\
\bar{V}(x) &= \mathop{\mathbf{a}}_{i=1}^N V(x_i)
\end{aligned}$$

В следующей теореме мы охарактеризуем условия, при которых цель стабилизации (2.2) достигается для сценария, не имеющего аналогов, либо практически ( $\alpha_{0i} > 0$ ), либо точно ( $\alpha_{0i} = 0$ ). Мы прокомментируем потенциальную выгоду от практической стабильности сразу после доказательства этой теоремы. Чтобы облегчить вывод, в ETS (2.6) пусть  $\alpha_{0i} \geq 0$ ,  $\alpha_{1i} > 0$  и

$\beta_i \in (0, \sigma)$  являются действительными скалярами,

$$s = \frac{1}{l_{\max}(P)} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \min(Q_{um}) - a \frac{m_{cN}^2}{m_{c1}^2} l_{\max}^2 (K^T R K) \frac{\ddot{\theta}}{\theta}$$

$$a \hat{c} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left( 0, \frac{m_{c1}^2 l_{\min}(Q_{um})}{m_{cN}^2 l_{\max}^2 (K^T R K)} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right)$$

Определяется конструктивная степень свободы, обеспечивающая положительность  $\sigma$ .

**Утверждение 2.1.** Пусть управляющее усиление  $K$  и фиктивное усиление  $F$  рассчитываются с использованием задачи 1 mLQR. Следующее справедливо для частично неизвестных MAS взаимосвязанных агентов (8), линейного кооперативного протокола (2.3), оснащенного несвязанными системами импульсной аппроксимации (2.4)–(2.5), и ETS (2.6):

1. Если  $\alpha_{0i} > 0$ , все траектории состояний будут сходиться в окрестности начала координат (практическая стабильность). Если  $\alpha_{0i} = 0$  и  $\beta_i = \beta$ , все траектории состояний будут экспоненциально сходиться к началу координат (экспоненциальная стабильность).

2. Феномен Zeno исключается как в практических, так и в экспоненциальных сценариях стабильности.

**Доказательство.**

Часть 1. Робастная практическая и экспоненциальная устойчивость: Мы вводим функцию-кандидата Ляпунова:

$$\bar{V}(x) = x^T \bar{P} x \quad \bar{P} \succ 0$$

что, по сути, совпадает с параметром конструктивных свойств 1 для  $\bar{P} = I_N \ddot{A} P$ . Мы используем равенства в конструктивных свойствах 1 для вычисления  $\dot{V}$  вдоль неизвестных траекторий взаимосвязанных MAS с замкнутым контуром (9):

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \bar{V}_x^T (\bar{A}x + (H_c \ddot{A} BK)x + (H_c \ddot{A} BK)e + \bar{B}_f f) = \\
&= \bar{V}_x^T (\bar{A}x + \bar{B}v + \bar{B}_f w) + \bar{V}_x^T \bar{B}_c \ddot{E} v + \frac{\alpha H_c}{\epsilon m_{\epsilon 1}} \ddot{A} K \frac{\ddot{e}}{\epsilon} + \bar{V}_x^T \bar{B}_f (f - w) \quad \text{£} \\
&\quad \text{£} - x^T \bar{Q}_f x - v^T \bar{R}v - w^T \bar{W}w - 2v^T \bar{R} \frac{\alpha H_c}{\epsilon m_{\epsilon 1}} \ddot{A} K \frac{\ddot{e}}{\epsilon} - 2w^T \bar{W}f + 2w^T \bar{W}w \quad \text{£} \\
&\quad \text{£} x^T \bar{Q}_f x - v^T \bar{R}v + 2w^T \bar{W}w - (w^T \bar{W}w + 2w^T \bar{W}f + f^T \bar{W}f) - \\
&\quad - (x^T \bar{W}_f x - f^T \bar{W}f) - 2v^T \bar{R} \frac{\alpha H_c}{\epsilon m_{\epsilon 1}} \ddot{A} K \frac{\ddot{e}}{\epsilon} \quad \text{£} \\
&\quad \text{£} - \sum_{i=1}^N a_i x^T Q_{um} x_i - 2v^T \bar{R} \frac{\alpha H_c}{\epsilon m_{\epsilon 1}} \ddot{A} K \frac{\ddot{e}}{\epsilon}
\end{aligned}$$

где первое неравенство получено на основе  $-2v^T \bar{R} \ddot{E} v = -2v^T (E \ddot{A} R)v \leq 0$ , а последнее утверждение сделано с использованием неравенства (2.12) и определения  $Q_{um} \succeq 0$  из (2.13). Мы перепишем приведенное выше неравенство следующим образом

$$\dot{V} \leq x^T \bar{Q}_{um} x + \alpha x^T \frac{\alpha H_c^2}{\epsilon m_{\epsilon 1}^2} \ddot{A} (K^T R K)^2 \frac{\ddot{e}}{\epsilon} x + \frac{1}{a} e^T e \quad (2.15)$$

основываясь на предварительном обсуждении в первом абзаце раздела 2.2. Используя ETS (2.6), мы знаем, что  $\|e\|^2 \leq N\alpha_1 \exp^{-\beta t} + N\alpha_0$ , где  $\alpha_0 = \max_i \alpha_{0i}$ ,  $\alpha_1 = \max_i \alpha_{1i}$  и  $\beta = \min_i \beta_i$ . Таким образом,

$$\dot{V} \leq sV + \frac{N}{a} a_1 \exp^{-\beta t} + \frac{N}{a} a_0$$

где  $\sigma > 0$  вводится после ETS (2.6). Используя лемму сравнения [2.21], мы установили верхнюю границу функции-кандидата Ляпунова:

$$\bar{V}(t) \leq \exp^{-\sigma t} \bar{V}(0) + \frac{a_1 N}{a(s - b)} \exp^{-\beta t} + \frac{a_0 N}{as}$$

в которой мы проигнорировали отрицательные члены, связанные с  $-\exp^{-\sigma t}$ . Далее мы используем неравенство Рэлея–Ритца для определения верхней границы нормы для всех траекторий состояний:

$$\|x\|^2 \leq \frac{l_{\max}(P)}{l_{\min}(P)} \|x(0)\|^2 e^{-\sigma t} + \frac{a_1 N}{a l_{\min}(P)(s - b)} e^{-\beta t} + \frac{a_0 N}{a s l_{\min}(P)} \quad (2.16)$$

Часть 1.1. Практическая стабильность: Поскольку неравенства  $\sigma, \beta > 0$  удовлетворяются по замыслу, мы заключаем, что первые два члена в правой части (2.16) сходятся к нулю. Таким образом,

$$\|x(t)\|_{\mathbb{R}^n} \leq \sqrt{\frac{a_0 N}{\alpha \lambda_{\min}(P)}} \quad (2.17)$$

Часть 1.2. Экспоненциальная устойчивость: Когда все  $a_{0i} = 0$ , мы находим:

$$\|x(t)\|^2 \leq \frac{\alpha \lambda_{\max}(P)}{\alpha \lambda_{\min}(P)} \|x(0)\|^2 + \frac{a_1 N}{\alpha \lambda_{\min}(P)(s - b)} e^{-bt} \quad (2.18)$$

или

$$\|x_i(t)\| \leq \|x(t)\| \leq \sqrt{c_1} e^{-\frac{1}{2}bt}$$

потому что  $\min\{\sigma, \beta\} = \beta$  выполняется по замыслу. Теперь очевидно, что все траектории состояний сходятся к началу координат с гарантированной экспоненциальной скоростью  $\beta$  при наличии взаимосвязанных неопределенностей нелинейного моделирования с использованием неперiodической и несинхронной передачи информации.

## Часть 2. Независимость от Zeno

Используя определение  $e_i$ , приведенное в (2.9), мы находим, что ошибка импульсной аппроксимации каждого агента изменяется в соответствии со следующей динамикой:

$$\dot{e}_i = A e_i - \sum_{j \in N_i^c} \frac{\alpha_0}{\alpha} a_{ij} (x_i - x_j) + s_i^c x_i - \sum_{j \in N_i^c} \frac{\alpha_0}{\alpha} a_{ji} (e_i - e_j) + s_i^c e_i - B_f f_i \quad (2.19)$$

с начальным условием  $e_i(t_k^i) = 0$  для каждого интервала  $[t_k^i, t_{k+1}^i)$ . Отсюда выполняется неравенство

$$\begin{aligned} & \left\| \mathbf{A} \right\| \left\| \mathbf{e}_i \right\| + \left\| \mathbf{B} \mathbf{K} \frac{\mathbf{a}_0}{\mathbf{e}_i^j N_i^c} (x_i - x_j) + s_i^c x_i \frac{\dot{\mathbf{e}}}{\mathbf{e}} \right\| - \\ & - \left\| \mathbf{B} \mathbf{K} \frac{\mathbf{a}_0}{\mathbf{e}_i^j N_i^c} (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) + s_i^c \mathbf{e}_i \frac{\dot{\mathbf{e}}}{\mathbf{e}} \right\| + \left\| \mathbf{B}_f \right\| \left\| \mathbf{f}_i \right\| \end{aligned} \quad (2.20)$$

Перепишем его следующим образом:

$$\left\| \mathbf{A} \right\| \left\| \mathbf{e}_i \right\| + c_2 \left\| \mathbf{e} \right\| + c_3 \left\| \mathbf{x} \right\| \quad (2.20a)$$

где коэффициенты определяются как

$$\begin{aligned} c_2 &= \left\| \mathbf{H} \right\| \left\| \mathbf{B} \mathbf{K} \right\| \\ c_3 &= c_2 + \sqrt{\mathbf{g}_f \mathbf{g}_c} \left\| \mathbf{A}_a \right\| \left\| \mathbf{B}_f \right\| \end{aligned}$$

Часть 2.1. Практическая стабильность

В (2.20) мы используем неравенство

$$\frac{d}{dt} (\left\| \mathbf{e}_i \right\|) = \frac{d}{dt} (\sqrt{\mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i}) = \frac{\mathbf{e}_i^T \frac{d\mathbf{e}_i}{dt}}{\left\| \mathbf{e}_i \right\|} = \frac{\mathbf{e}_i^T \left( \left\| \mathbf{A} \right\| \left\| \mathbf{e}_i \right\| + c_2 \left\| \mathbf{e} \right\| + c_3 \left\| \mathbf{x} \right\| \right)}{\left\| \mathbf{e}_i \right\|^2} = \left\| \mathbf{A} \right\|$$

вместе с верхней границей  $\left\| \mathbf{e} \right\| \leq N(\alpha_0 + \alpha_1)$ , гарантируемой ETS (2.6) и

$$\left\| \mathbf{x} \right\| \leq \sqrt{c_1 + \frac{a_0 N}{\text{asg}_{\min}(\mathbf{P})}}$$

на основании (2.16) для получения:

$$\frac{d}{dt} (\left\| \mathbf{e}_i \right\|) \leq \left\| \mathbf{A} \right\| \left\| \mathbf{e}_i \right\| + c_4 \quad (2.21)$$

где

$$c_4 = c_2 \sqrt{N(a_0 + a_1)} + c_3 \sqrt{c_1 + \frac{a_0 N}{\text{asl}_{\min}(\mathbf{P})}}.$$

Используя лемму сравнения, начиная с  $\left\| \mathbf{e}_i(t_k^i) \right\| = 0$ , норма ошибки

ограничена сверху следующим образом:

$$\left\| \mathbf{e}_i(t) \right\| \leq e^{\left\| \mathbf{A} \right\| t} \left\| \mathbf{e}_i(t_k^i) \right\| + \frac{c_4}{\left\| \mathbf{A} \right\|} \left( e^{\left\| \mathbf{A} \right\| (t - t_k^i)} - 1 \right) \quad (2.22)$$

Основываясь на ETS (2.6), мы знаем, что

$$a_0^{\min} = \min_i a_{0i} \mathbb{E} \left\| e_i(t_{k+1}^i) \right\|$$

выполняется во время (следующего) запуска. Таким образом, мы находим приблизительную нижнюю границу для каждого временного интервала между событиями:

$$t_{k+1}^i - t_k^i \geq \frac{1}{\|A\|} \log_e \frac{\alpha}{\beta} + a_0^{\min} \frac{\|A\|}{c_4} \frac{\delta}{\epsilon} > 0 \quad (2.23)$$

Этой строго положительной нижней границы достаточно, чтобы исключить поведение Zeno из ETS (2.6), когда  $\alpha_{0i} \neq 0$ . Обратите внимание, что когда  $\|A\|=0$ , например, в системе взаимосвязанных агентов-интеграторов, эта нижняя граница изменяется на  $\frac{a_0^{\min}}{c_4}$  путем решения (2.21).

## Часть 2.2. Экспоненциальная устойчивость

В (2.20) мы используем неравенство  $\frac{d}{dt} (\|e_i\|) \mathbb{E} \| \dot{e}_i \|$  вместе с  $\|e\| \mathbb{E} \sqrt{Na_1}$ , гарантируемым ETS (6) и  $\|x\| \mathbb{E} \sqrt{c_1}$ , основанным на (2.16), чтобы получить:

$$\frac{d}{dt} (\|e_i\|) \mathbb{E} \|A\| \|e_i\| + c_5 e^{-\frac{1}{2}bt}$$

где  $c_5 = c_2 \sqrt{Na_1} + c_3 \sqrt{c_1}$ . Поскольку  $\|e_i(t_k^i)\| = 0$ , время отклика нормы ошибок ограничено по верхнему пределу следующим образом:

$$\|e_i(t)\| \mathbb{E} \frac{c_5}{\|A\| + \frac{1}{2}b} \frac{\alpha}{\beta} \exp^{\|A\|(t-t_k^i) - \frac{1}{2}bt_k^i} - \exp^{-\frac{1}{2}bt} \frac{\delta}{\epsilon}$$

Из ETS (2.6) известно, что

$$\sqrt{a_1} \exp^{-\frac{1}{2}bt_{k+1}^i} \mathbb{E} \|e_i(t_{k+1}^i)\|$$

выполняется в (следующий) момент времени запуска  $t_{k+1}^i$ . Таким образом, мы находим:

$$t_{k+1}^i - t_k^i \leq \frac{1}{\|A\| + \frac{1}{2}b} \log_e \left( 1 + \frac{\sqrt{a_1} \|A\| + \frac{1}{2}b}{c_5} \right) > 0 \quad (2.24)$$

что достаточно для доказательства свободного от Zeno поведения ETS (2.6), когда  $\alpha_{0i} = 0$ .  $\square$

**Замечание** (Практическая стабильность). Есть несколько моментов, которые добавляют термин смещения в свои ETS, чтобы доказать независимость от Zeno [2.16]. Согласно утверждению 2.1, мы доказали Zeno-поведение ETS (2.6), когда  $\alpha_{0i} = 0$  для всех  $i$ . Это приводит к устойчивой экспоненциальной сходимости всех траекторий двухслойного взаимосвязанного MAS к началу координат. Мы можем использовать стратегию предвзятого запуска, чтобы избежать очень быстрых событий запуска, или, вдохновленные литературой по адаптивному управлению [2.5], принять практическую стабильность, чтобы повысить надежность ETS в отношении несоответствий моделирования (немоделированных и неизвестных источников неопределенностей моделирования). В частности, мы стремимся снизить чувствительность общего числа событий трансляции информации к шуму, который может быть добавлен к измерениям для обеспечения конфиденциальности в CPS (например, см. концепцию дифференциальной конфиденциальности в [2.9] и замечание 2). Кроме того, в отличие от настройки экспоненциальной стабильности,  $\beta_i$  может быть неидентичным, когда  $\alpha_{0i} > 0$ .

### 2.3.2. Согласованный сценарий

Мы рассматриваем MAS следующих агентов:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + B(u_i(t) + g_i(y_i(t), t)) \\ y_i(t) &= C_{y_i} \sum_{j \in N_i^a} a_{ij}^a x_j \end{aligned} \quad (2.25)$$

с соответствующими погрешностями моделирования. Здесь  $y_i \in \mathbb{R}^{n_y}$  обозначает переменную взаимосвязи  $i$ -го агента и неизвестную матрицу  $C_{yi} \in \mathbb{R}^{n_y \times n_x}$  взаимосвязей, удовлетворяющую

$$\|C_{yi}\|^2 \leq \gamma_{ci},$$

где  $\gamma_c = \max\{\gamma_{ci}\} \in \mathbb{R}^+$  - известный скаляр для разработчика уровня управления.

Неизвестные нелинейные функции  $g_i: \mathbb{R}^{n_u} \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{n_u}$  кусочно-непрерывны во времени и по Липшицу на  $\mathbb{R}^{n_u}$ . Однако, как и в разделе 2.3.1, нам известен только скаляр  $\gamma_g = \max_i\{\gamma_{gi}\} \in \mathbb{R}^+$ , который удовлетворяет некоторым точечным неравенствам (по сравнению с неравенствами Липшица)

$$g_i^T(y_i, t) \leq \gamma_{gi} y_i^T y_i.$$

Мы заинтересованы в разработке коэффициента усиления  $K$  таким образом, чтобы цель стабилизации (2.2) достигалась с помощью протокола статического линейного взаимодействия (2.3), оснащенного импульсными аппроксиматорами (2.4)–(2.5), которые неперiodически и несинхронно обновляются в соответствии с ETS (2.6). Мы выполняем действия, описанные в разделе 2.3.1, и находим двухслойную взаимосвязанную MAS поверх  $G_a$  и  $G_c$ :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \bar{A}x + (H_c \ddot{A} BK)x + (H_c \ddot{A} BK)e + (I_N \ddot{A} B)g(y) \\ y &= C_y (A_a \ddot{A} I_{n_x})x \end{aligned} \quad (2.26)$$

где  $y = \text{col}\{y_i\}$  и  $C_y = \text{diag}\{C_{yi}\}$ . Мы можем разделить компоненты этой агрегированной модели аналогично (2.9) и, благодаря особому формату предложенных формулировок в разделе 2.3.1, показать, что сетевая динамика в согласованном сценарии остается точно такой же, как в (2.10).

Поскольку неопределенности моделирования находятся в диапазоне матрицы управляющих входных данных (согласованный сценарий), мы

рассмотрим относительно более простой случай, используя следующую малоразмерную сетевую номинальную динамику:

$$\dot{x}'_i = Ax'_i + m_{c1} Bv'_i \quad (2.27)$$

В отличие от (2.11), здесь нет необходимости в фиктивном управляющем вводе, и мы сосредоточимся только на разработке потенциального коэффициента усиления  $K$ , который будет использоваться в протоколе совместной стабилизации (2.3).

Пусть

$$R_g = g_g g_g \max(R) \|A_a\|^2 I_{n_x}$$

для которого выполнено

$$g^T(y') \bar{R} g(y') \leq x'^T \bar{R}_g x'$$

где  $\bar{R}_g = I_N \ddot{A} R_g$ .

Определим  $Q_g = Q + R_{gu}$ , где  $R_{gu} = \frac{1}{m_{c1}^2} R_g$ , и определим функцию

стоимости следующим образом:

$$J(x'_i(t)) = \int_t^{\infty} (x_i'^T(t) Q_m x'_i(t) + v_i'^T(t) R v'_i(t)) dt .$$

**Модифицированная задача LQR 2.** Пусть  $C_i$  - набор всех допустимых (с линейной обратной связью по состоянию) стабилизирующих управляющих сигналов  $v_i$  для номинальной динамики сети в (2.27). Тогда решение следующей задачи mLQR дает потенциальный коэффициент усиления  $K$  для использования в совместном протоколе (2.3):

$$V(x'_i(0)) = \min_{u_i \in C_i} J(x'_i(0))$$

при условии (2.27).

Сначала отметим, что любое решение  $K = -\mu_{c1} R^{-1} B^T P$  этой задачи mLQR является потенциальным стабилизирующим коэффициентом усиления, который будет использоваться в (2.3) для согласованного сценария, и

матрица  $P \hat{=} R^{n_x \times n_x}$  получается с использованием малоразмерного преобразования:

$$A^T P + PA + Q_g = m_{c1}^2 PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (2.28)$$

для которого существование и единственность положительно определенного стабилизирующего решения гарантируются стабилизируемостью и наблюдаемостью тройки  $(Q_g^{1/2}, A, m_{c1}B)$ , где  $Q_g^{T/2}Q_g^{1/2} = Q_g$ . После нескольких манипуляций, аналогичных описанным в разделе 2.3.1, мы получаем следующие условия оптимальности.

**Конструктивные свойства 2.** Агрегированные MAS с замкнутым контуром сетевой номинальной динамики (27) с  $v = \bar{K}x$  в задаче 2 mLQR удовлетворяют следующим равенствам:

$$\begin{aligned} x^T \bar{Q}_g x + v^T \bar{R} v + \bar{V}_x^T (\bar{A}x + \bar{B}v) &= 0 \\ 2v^T \bar{R} + \bar{V}_x^T \bar{B} &= 0 \end{aligned}$$

где  $\bar{Q}_g = I_N \ddot{A} Q_g$ .

Теперь мы охарактеризуем условия, при которых цель стабилизации (2.2) достигается для соответствующего сценария либо практически ( $\alpha_{0i} > 0$ ), либо точно ( $\alpha_{0i} = 0$ ). В ETS (6) положим  $\alpha_{0i} \geq 0$ ,  $\alpha_{1i} > 0$ ,  $b_i \hat{=} (0, s)$ ,

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{l_{\max}(P)} \frac{\varepsilon}{\varepsilon} \underset{\varepsilon}{\min}(Q) - a \frac{m_{cN}^2}{m_{c1}^2} l_{\max}^2(K^T R K) \frac{\ddot{o}}{\ddot{o}} \\ a \hat{=} & \frac{\varepsilon}{\varepsilon} 0, \frac{m_{c1}^2 \underset{\varepsilon}{\min}(Q)}{m_{cN}^2 l_{\max}^2(K^T R K)} \frac{\ddot{o}}{\ddot{o}} \end{aligned}$$

**Утверждение 2.2.** Пусть коэффициент усиления стабилизации  $K$  рассчитывается с использованием задачи mLQR 2. Результаты утверждения 2.1 справедливы для множества взаимосвязанных агентов (2.25) с согласованными неопределенностями моделирования, линейным протоколом взаимодействия (2.3), оснащенным несвязанными системами импульсной аппроксимации (2.4)–(2.5) и ETS (2.6).

**Доказательство.** Мы предлагаем  $\bar{V}(x) = x^T \bar{P} x + f_0$  в качестве кандидата функцию Ляпунова, которая является такой же, как функция оптимальных затрат в задаче mLQR 2 с положительно определенным  $P$  из (2.28). Теперь, вдоль неизвестных траекторий двухслойной взаимосвязанной MAS (2.26), получаем

$$\begin{aligned} \dot{\bar{V}} &= \bar{V}_x^T \dot{x} + \bar{V}_v v + \bar{V}_e \dot{e} + \bar{V}_{m_1} \dot{m}_1 + \bar{V}_{g_m} \dot{g}_m = \\ &= -x^T \bar{Q}_m x - v^T \bar{R} v - 2v^T \bar{R} \bar{E} v - 2v^T \bar{R} \frac{\alpha H_c}{c m_1} \ddot{A} K \dot{e} - 2v^T \bar{R} g_m \dot{\epsilon} \\ &\epsilon - x^T \bar{Q} x - \left( v^T \bar{R} v + 2v^T \bar{R} g_u + g_m^T \bar{R} g_m \right) - \left( x^T \bar{R}_{mm} x - g_m^T \bar{R} g_m \right) - \\ &- 2v^T \bar{R} \frac{\alpha H_c}{c m_1} \ddot{A} K \dot{e} \epsilon - x^T \bar{Q} x - 2x^T \frac{\alpha H_c}{c m_1} \ddot{A} K^T R K \dot{e} \end{aligned}$$

там, где мы использовали  $-2v^T \bar{R} \bar{E} v \leq 0$ , условия проектирования свойств

2, и  $g_m = \frac{1}{m_1} g$ . Далее это можно переписать как:

$$\dot{\bar{V}} \leq -x^T \bar{Q} x + \alpha x^T \frac{\alpha H_c^2}{c m_1^2} \ddot{A} (K^T R K)^2 \dot{e} x + \frac{1}{a} e^T e$$

которая имеет ту же структуру, что и (2.15), но основана на расчетной матрице  $\bar{Q} \geq 0$ , а не на  $Q_{um} \geq 0$ . Таким образом, остальная часть этого доказательства выполняется по тем же этапам, что и в утверждении 1, с небольшими изменениями значений параметров, таких как

$$c_3 = c_2 + \sqrt{g_g g_c} \|A_a\| \|B\|$$

с использованием  $\gamma_g$ .  $\square$

## 2.4. Имитационная верификация

Рассмотрим теоретические идеи из раздела 2.3.1 и построим двухуровневую (организационную) взаимосвязанную MAS с восемью агентами.

Слой агентов показывает неизвестную топологию взаимосвязей  $G_a$

между агентами  $a_i$ , где синие и голубые стрелки представляют направленные ребра с положительным и отрицательным знаками ( $\pm 1$ ) соответственно. Управляющий уровень представляет собой реализацию протокола совместной стабилизации (2.3) на управляющих узлах  $c_i$  через  $G_c$ , с весом ребра 1 для каждой черной стрелки и 0,5 для каждой красной стрелки. Мы назначаем две стрелки между каждым управляющим узлом, чтобы подчеркнуть несинхронную (и непериодическую) передачу информации каждым управляющим узлом в соответствии с ETS (2.6).

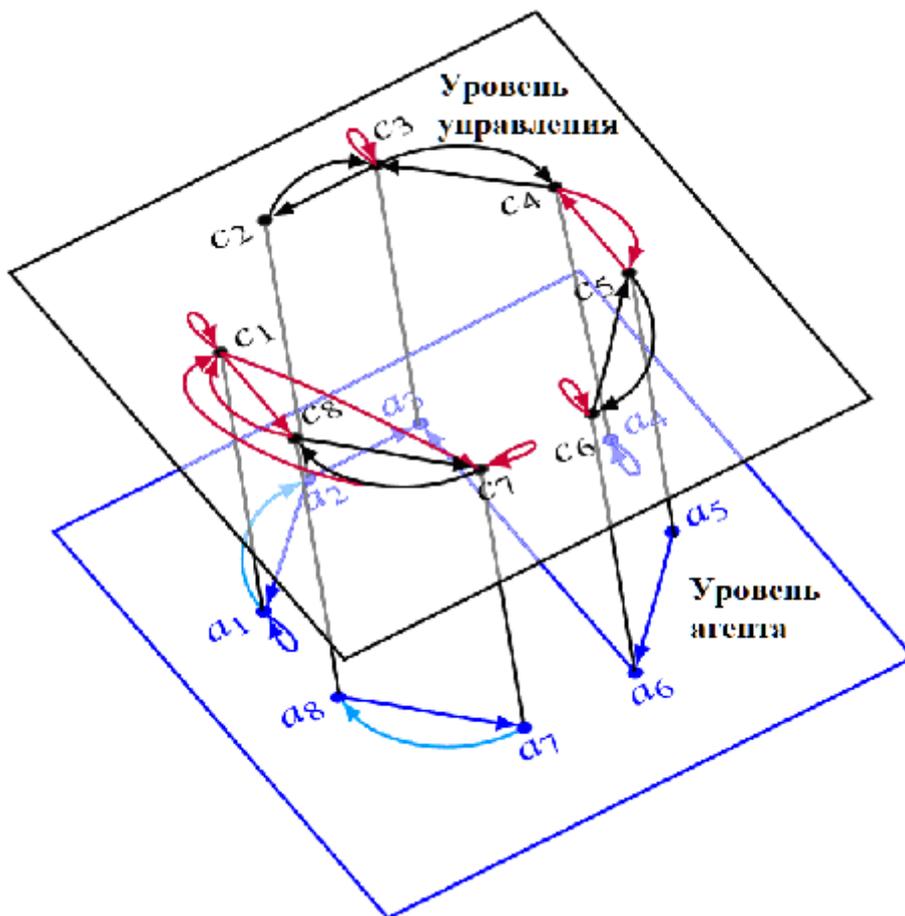


Рис. 2.1. Двухслойная взаимосвязанная MAS

#### 2.4.1. Непарный сценарий

Рассмотрим MAS из 8 агентов (2.8):

$$A = \begin{pmatrix} \hat{e} & 0 & 1.5\hat{u} \\ \hat{e} & -0.5 & 0 \\ \hat{e} & & \hat{u} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \hat{e} & 0 \\ \hat{e} & \hat{u} \\ \hat{e} & \hat{u} \end{pmatrix}, \quad B_f = \begin{pmatrix} \hat{e} & 0.1 \\ \hat{e} & -0.5 \\ \hat{e} & \hat{u} \end{pmatrix}$$

Далее, для целей моделирования, мы определяем  $C_{z_i} = [0, 0,5]$  для  $i \in \{1, 3, 5, 7\}$  и  $C_{z_i} = [0, 1]$  для  $i \in \{2, 4, 6, 8\}$ . Матрица смежности  $A_a$  может быть найдена с помощью графа уровня агента на рис. 1, и соответствующие взаимосвязанные нелинейности выглядят следующим образом:  $f_1(z_1, t) = 0.5 \operatorname{tg}(z_1)$ ,  $f_2(z_2) = 0.4 \sin(z_2)$ ,  $f_3(z_3, t) = 0.5 \sin(t) \operatorname{tg}(z_3)$ ,  $f_4(z_4) = 0.4 \operatorname{tg}(z_4)$ ,  $f_5(z_5) = 0.5 \sin(z_5)$ ,  $f_6(z_6, t) = 0.4 \sin(t) \sin(z_6)$ ,  $f_7(z_7) = 0.5 z_7$ , and  $f_8(z_8) = 0.4 \operatorname{tg}(z_8)$ . Это создает частично неизвестную взаимосвязанную систему незамкнутой MAS с расходящимися траекториями.

Мы приводим топологию связи в качестве управляющего уровня на рис. 2.1, который будет использоваться для получения модифицированной матрицы Лапласа  $H_c$ . Мы используем формулу mLQR 1, чтобы найти  $K = -[6.8305, 12.4479]$  и  $F = [0.1742, 0.5150]$ , которые удовлетворяют (2.13). Мы реализуем  $K$  в протоколе совместной стабилизации (3) с  $\alpha_{01} = 5 \times 10^{-6}$  и  $\alpha_{0i} = 10^{-5}$  для остальных узлов управления,  $\alpha_{11} = \alpha_{14} = \alpha_{17} = 0.003$  и  $\alpha_{12} = \alpha_{15} = \alpha_{18} = 0.006$ ,  $\alpha_{13} = \alpha_{16} = 0.009$  и  $\beta_i = 4.3474$  для всех узлов управления. На рис. 2.2 изображены сходящиеся траектории двухуровневой MAS. На рис. 2.3 показаны запускающие события в течение переходного периода времени, а также время окончания моделирования, когда все траектории состояний находятся вблизи начала координат (при  $t \rightarrow \infty$ ). Далее, основываясь на результатах моделирования за 50 секунд, мы записали 281, 206, 333, 264, 287, 320, 313, и 261 как количество запускающих событий для агентов с 1 по 8.

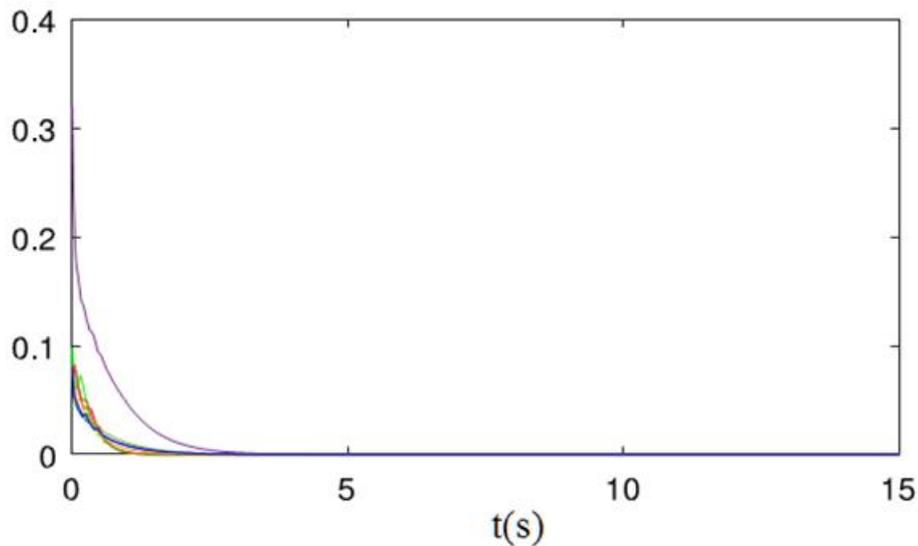


Рис. 2.2. Сходящееся поведение  $\|x_i\|$  в непарном сценарии для  $i \in \{1, 2, \dots, 8\}$ .

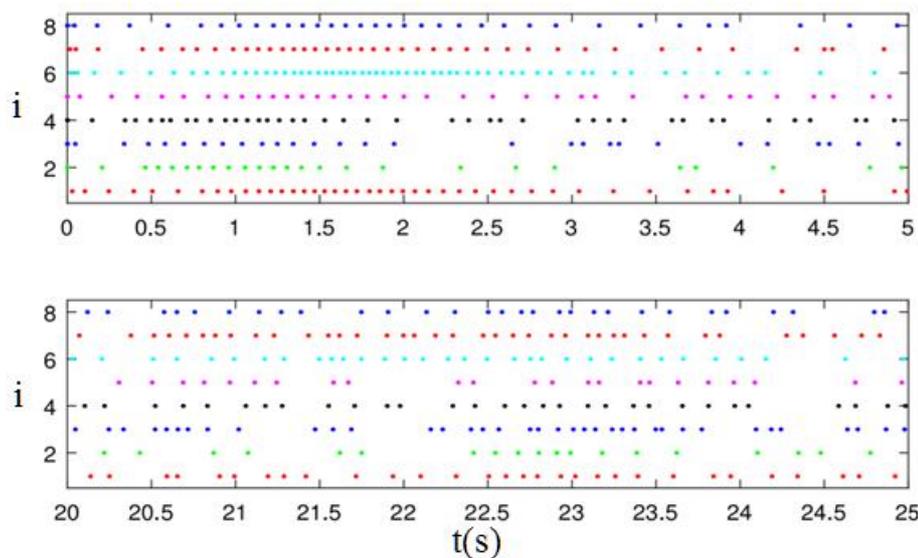


Рис. 2.3. Распределение запускающих событий в непарном сценарии. Запускающие события для переходного периода  $t \in [0, 5]$  (вверху) и для времени, когда все траектории находятся вблизи начала координат  $t \in [20, 25]$  (внизу)

#### 2.4.2. Согласованный сценарий

Используя все знания о математической модели, т.е. о типе нелинейностей и лежащей в их основе топологии взаимосвязей, в [2.38] был разра-

ботан набор нелинейно связанных контроллеров для стабилизации системы. Полученный сетевой контроллер мы называем базовым контроллером с нелинейной связью.

После нескольких манипуляций с математической моделью системы из трех агентов мы приходим к взаимосвязанному MAS (2.8).  $A_a \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  можно легко найти, используя базовую взаимосвязь, и  $C_{yi} = -[1, 0]$ . Однако мы предполагаем, что для целей проектирования известна неточная модель системы с тремя тележками: А и В, которые представляют собой двойной интегратор,  $\|A_a\|$ ,  $\gamma_g$  и  $\gamma_c$ , как описано в (2.25), и разработчик уровня управления не располагает информацией о типе нелинейностей ( $\text{tg}(\cdot)$ ) и лежащую в его основе топологию межсоединений. В этом случае невозможно будет спроектировать базовый контроллер с нелинейной связью. Мы реализуем совместный протокол (2.3) с

$$L_c = \begin{pmatrix} \hat{e} & 1 & 0 & -1 \\ \hat{e} & 0 & 1 & -1 \\ \hat{e} & 1 & -1 & 2 \end{pmatrix}, \quad S_c = \begin{pmatrix} \hat{e} & 0.5 & 0 & 0 \\ \hat{e} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{e} & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

для характеристики  $G_c$ . Это означает, что коммуникационная топология уровня управления отличается от (неизвестной) топологии взаимодействия уровня агента, и оператору уровня управления не разрешается напрямую использовать абсолютную импульсную переменную второго агента для целей управления. Мы используем формулу mLQR 2 с  $Q=I_2$  и  $R=1$  и находим  $K = -[10.5038, 12.1219]$  для использования в (2.3).

Далее мы определяем  $\alpha_{01} = \alpha_{02} = 10^{-5}$ ,  $\alpha_{03} = 10^{-4}$ ,  $\alpha_{11} = \alpha_{13} = 10^{-4}$ ,  $\alpha_{12} = 10^{-5}$ , и  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0.5867$  в ETS (2.6).

Для этих двух случаев сходящиеся траектории систем показаны на рис. 2.4, а количество запускающих событий указано в табл. 2.1. Предлагаемый протокол линейного взаимодействия (2.3) позволяет нам получить результат, аналогичный результату работы базового контроллера с нелинейной связью, но с коэффициентом усиления при стабилизации, который

разработан без детального знания типа нелинейностей и топологии взаимодействия на уровне агентов.

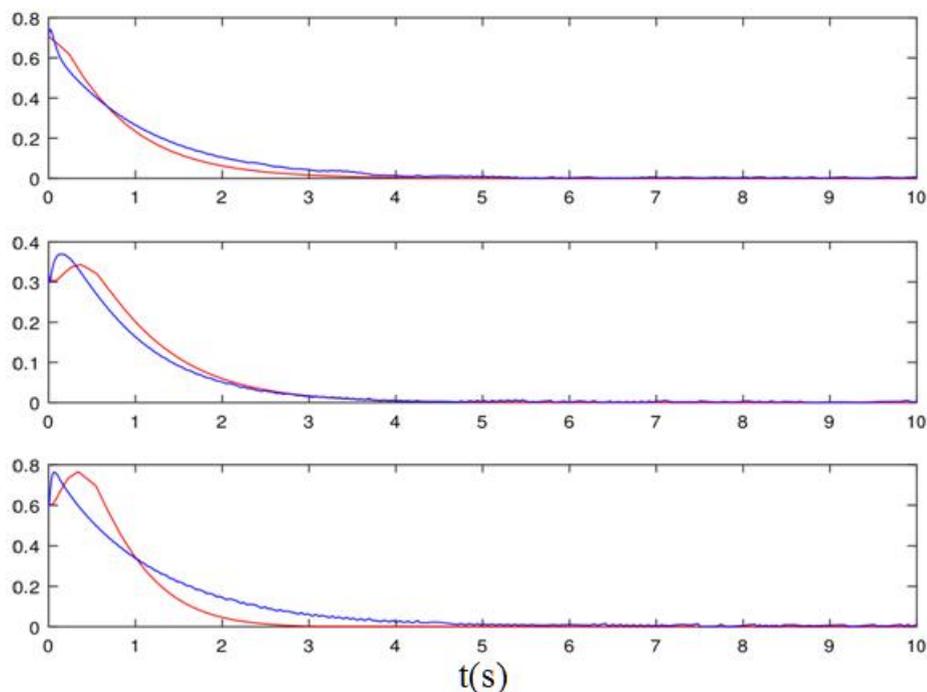


Рис. 2.3. Стабилизация системы, вызванная событием. Сверху вниз расположены  $\|x_1\|$ ,  $\|x_2\|$  и  $\|x_3\|$ . Красная и синяя траектории соответствуют базовой линии с нелинейной связью и предлагаемому статическому линейному совместному контроллеру, соответственно. При меньшем количестве запускающих событий и неполных математических знаниях предлагаемый протокол линейной стабилизации обеспечивает сходящийся отклик, относительно аналогичный базовому контроллеру с нелинейной связью

Стратегии, запускаемые событиями, могут обеспечивать определенный уровень внутренней устойчивости к шуму (см. раздел 5 из [2.15]). Тем не менее, во многих существующих стратегиях, запускаемых событиями, сложно наблюдать поведение без использования Zeno [2.4]. В частности, мы отмечаем, что наличие шума (рассогласования) не учитывается на этапах моделирования и проектирования управления базовым контроллером и предлагаемым протоколом совместной стабилизации. Чтобы изучить его влияние, мы добавляем ко всем измерениям белый шум с ограниченной

полосой частот мощностью  $10^{-8}$  таким образом, чтобы намеренно были незначительные различия, с которыми могут справиться оба контроллера этого подраздела. Однако стоимость такого надежного временного реагирования на несоответствие шумов проявляется в увеличении числа запускающих событий в последних двух строках табл. 2.1. Хотя оба метода работают без ошибок, практическая реализация утверждения 2.2 относительно надежна в отношении этого несоответствия шума (см. замечание 3).

Таблица 2.1

Количество запускающих событий на основе 50-секундного моделирования

	$c_1$	$c_2$	$c_3$	Итого
Базовый метод (без шума)	308	357	314	979
Предложенный метод (без шума)	185	252	257	694
Базовый метод (зашумленный)	1233	1605	1321	4159
Предложенный метод (зашумленный)	218	269	264	751

## 2.5. Выводы

Предложена смешанная оптимальная и основанная на теории графов формулировка для моделирования и совместного управления взаимосвязанными МАС. Этот фреймворк позволяет нам охватить архитектурный аспект, который разработан на основе полностью известной математической модели CPS, и устранить неопределенности моделирования в физических компонентах и энергоэффективности в кибернетической сети системы.

Абсолютная свобода предложенной ETS и надежная экспоненциальная сходимости всех траекторий состояний к началу координат или их окрестности теоретически доказаны как для несогласованных, так и для согласованных неопределенностей моделирования. Хотя последний случай приводит к неточному выполнению задачи стабилизации, в ходе модели-

рования мы показали, что он обеспечивает больше параметров настройки, которые будут использоваться для снижения чувствительности предлагаемой ETS к шуму.

В дополнение к легко учитываемым неопределенностям моделирования, энергоэффективности и шуму, предлагаемая двухуровневая структура обеспечивает надлежащую основу для отделения сбоев и помех (на уровне агентов) от кибератак (на уровне управления). Следовательно, это позволяет нам систематически выявлять наличие этих аномалий в CPS, которые будут изучены в будущем.

## **Источники к главе 2**

2.1. Ai, X., Yu, J., Jia, Z., Shen, Y., Ma, P., & Yang, D. (2017). Adaptive robust consensus tracking for non-linear second-order multi-agent systems with heterogeneous uncertainties. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27, 5082–5096.

2.2. Almeida, J., Silvestre, C., & Pascoal, A. (2017). Synchronization of multiagent systems using event-triggered and self-triggered broadcast. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(9), 4741–4746.

2.3. Antsaklis, P. (2014). Goals and challenges in cyber-physical systems research: Editorial of the editor in chief. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(12), 3117–3119.

2.4. Brogers, D., & Heemels, W. (2014). Event-separation properties of event-triggered control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(10), 2644–2656.

2.5. Brogliato, B., & Neto, A. (1995). Practical stabilization of a class of nonlinear systems with partially known uncertainties. *Automatica*, 31(1), 145–150.

2.6. Cardenas, A., Amin, S., & Sastry, S. (2008). Research challenges for the security of control system. In 3rd workshop on hot topics in security. USA.

2.7. Chen, Z., Han, Q.-L., Yan, Y., & Wu, Z.-G. (2020). How often should one update control and estimation: Review of networked triggering techniques. *Science China Information Sciences*, 63, 1–18.

2.8. Cheng, Y., & Ugrinovskii, V. (2017). Event-triggered leader-follower tracking control for interconnected systems with undirected communication graphs. In American cont. conf. USA.

2.9. Cortes, J., Dullerud, G., Jerome, S., Ny, L., Mitra, S., & Pappas, G. (2016). Differential privacy in control and network systems. In IEEE conf. on decision and cont. USA.

2.10. Dahleh, M., & Rinehart, M. (2011). Decision and communication

networks: Overview and challenges. In T. Samad, & A. Annaswamyn (Eds.), *The impact of cont. technology, part 3: Cross-cutting research direction*. IEEE CSS.

2.11. Danziger, M., Bashan, A., Berezin, Y., Shekhtman, L., & Havlin, S. (2014). An introduction to interdependent networks. In *Int. conf. on nonlinear dynamics of electronic systems* (pp. 189–202). Bulgaria.

2.12. Dashkovskiy, S., Buffer, B., & Wirth, F. (2010). Small gain theorems for large scale systems and construction of ISS Lyapunov functions. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 48(6), 4089–4118.

2.13. De Persis, C., Sailer, R., & Wirth, F. (2013). Parsimonious event-triggered distributed control: A zero free approach. *Automatica*, 49, 2116–2124.

2.14. Egerstedt, M. (2015). From algorithms to architectures in cyber-physical networks. *Cyber-Physical Systems*, 1(2–4), 67–75.

2.15. Forni, F., Galeani, S., Nesic, D., & Zaccarian, L. (2014). Event-triggered transmission for linear control over communication channels. *Automatica*, 50, 490–498.

2.16. Garcia, E., Cao, Y., & Casbeer, D. (2014). Decentralized event-triggered consensus with general linear dynamics. *Automatica*, 50, 2633–2640.

2.17. Ge, X., Han, Q.-L., Zhang, X.-M., Ding, L., & Yang, F. (2020). Distributed event-triggered estimation over sensor networks: A survey. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 50(3), 1306–1320.

2.18. Goebel, R., Sanfelice, R., & Teel, A. (2012). *Hybrid dynamical systems: Modeling, stability, and robustness*. Princeton.

2.19. Guinaldo, M., Dimarogonas, M., Johansson, K., Sanchez, J., & Dormido, S. (2013). Distributed event-based control strategies for interconnected linear systems. *IET Control Theory & Applications*, 7(6), 877–886.

2.20. Hetel, L., Fiter, C., Omran, H., Seuret, A., Fridman, E., Richard, J., & Niculescu, S. (2017). Recent developments on the stability of systems with aperiodic sampling: An overview. *Automatica*, 76, 309–335.

- 2.21. Khalil, H. (2002). *Nonlinear systems*. Prentice Hall.
- 2.22. Lin, F. (2007). *Robust control design: An optimal control approach*. Wiley.
- 2.23. Liu, T., Cao, M., De Persis, C., & Hendrickx, J. (2017). Distributed event-triggered control for asymptotic synchronization of dynamical networks. *Automatica*, 86, 199–204.
- 2.24. Lombana, D., & Bernardo, M. (2016). Multiplex PI control for consensus in networks of heterogeneous linear agents. *Automatica*, 67, 310–320.
- 2.25. Lunze, J. (1992). *Feedback control of large-scale systems*. Prentice-Hall.
- 2.26. Mesbahi, M., & Egerstedt, M. (2010). *Graph theoretic methods in multiagent networks*. Princeton.
- 2.27. Oh, K.-K., Moore, K., & Ahn, H.-S. (2014). Disturbance attenuation in a consensus network of identical linear systems: An  $H_2$  approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(8), 2164–2169.
- 2.28. Ploennigs, J., Vasyuynskyy, V., & Kabitzsch, K. (2010). Comparative study of energy-efficient sampling approaches for wireless control networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(3), 416–424.
- 2.29. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2016). Distributed decoupling of linear multiagent systems with interconnected nonlinear uncertainties. In *IEEE conf. on decision and cont. USA*.
- 2.30. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2019). Discrete-time linear distributed tracking protocols for nonlinearly interconnected multiagent systems. In *AIAA conference on guidance, navigation, and cont. USA*.
- 2.31. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2019). Event-triggered robust cooperative stabilization in nonlinearly interconnected multiagent systems. *European Journal of Control*, 48, 9–20.
- 2.32. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2019). Multi-layer distributed protocols for robust cooperative tracking in interconnected nonlinear multiagent sys-

tems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 29, 3859–3891.

2.33. Rieger, C., Moore, K., & Baldwin, T. (2013). Resilient control systems: A multiagent dynamic systems perspective. In *Int. conf. on electro-information technology*. USA.

2.34. Stocker, C., & Lunze, J. (2013). Distributed control of interconnected systems with event-based information requests. In *IFAC workshop on distributed estimation and cont. in networked systems*. Germany.

2.35. Sun, Z., Huang, N., Anderson, B., & Duan, Z. (2018). Comments on distributed event-triggered control of multi-agent systems with combinational measurements. *Automatica*, 92, 264–265.

2.36. Tuna, E. (2016). Synchronization under matrix-weighted Laplacian. *Automatica*, 73, 76–81.

2.37. Wang, X., & Lemmon, M. (2013). Event-triggered broadcasting across distributed networked control systems. In *American cont. conf.* USA.

2.38. Wang, X., & Lemmon, M. (2011). Event-triggering in distributed networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(2), 586–601.

2.39. Willig, A. (2008). Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 4(2), 102–124.

2.40. Zhao, M., Peng, C., He, W., & Song, Y. (2018). Event-triggered communication for leader-following consensus of second-order multiagent systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 48(6), 1888–1897.

### **3. Адаптивная мультиагентная система с контролем действий агентов на основе модального подхода к сознанию агентов**

#### **3.1. Осознание и контент**

Осознание агента моделируется как модальный оператор таким образом, что осознание может быть повторено, а сознание формализовано как осознание осознанности. Агенты не обязательно являются людьми и априори могут быть животными, организациями или программным обеспечением, в которых ожидается, что осведомленность о настройках будет выражаться в степенях и поэтому моделируется неотрицательными реальными числами, а не просто логическими значениями. Таким образом, формализм выражает степень, в которой агент проявляет осведомленность (и, следовательно, сознательность).

Контекст - это адаптивная мультиагентная система, в которой агенты контролируют действия, индивидуально или в группах, и приспособливаются экоритмично, корректируя поведение в краткосрочной перспективе и эволюционируя в гораздо более долгосрочной перспективе. Законы и неравенства даны и доказаны как обоснованные, но интуиция подсказывает, что осознание "позволяет" действиям формировать следующий поведенческий шаг агента, в то время как сознание предоставляет агенту возможность адаптировать это поведение.

Долгое время считалось, что сознание выходит за рамки научного объяснения (т.е. не поддается объяснению путем редукции) и вместо этого является эмерджентным свойством такой сложной системы, как человеческий мозг. Сложная проблема понимания сознания не стала проще из-за того, что эта концепция охватывает нейрофизиологию, философию сознания, физику, компьютерные науки, науку о данных и, в последнее время, математику. Но последние десятилетия ознаменовались новым подходом: предложением архитектурных моделей для учета сознания. Несколько та-

ких моделей приведено в [3.19]. Вместе с успехом машинного обучения это привело к возобновлению интереса к вопросу о том, может ли искусственный агент быть разумным или несознательным.

Трактовка сознания, которая априори не исключает возможности ее применения к нечеловеческим существам, должна быть достаточно общей, чтобы охватывать организмы (такие как клетки, растения и животные), организации и искусственные агенты, но при этом не быть слишком слабой, когда она ограничивается людьми. Для таких объектов мы используем общий термин "агент". Мы предлагаем логическое понятие (агент осознает какую-либо особенность или нет) и числовое понятие (сила этого осознания).

Когда мы сталкиваемся со сложной концепцией, мы придерживаемся обычного подхода и, по возможности, прибегаем к выявлению свойств или законов вместо определения. Конечно, модель по-прежнему необходима, чтобы показать согласованность законов, и мы используем настолько простую модель, насколько это возможно. Цель этого подхода состоит в том, чтобы в конечном итоге выявить достаточное количество законов, характеризующих концепцию. В случае сознания, где, по-видимому, нет определения, он открывает заманчивый путь для прогресса.

Наш выбор законов основан на следующем предположении. Агент осознает нечто, что "позволяет" или "делает выполнимыми" действия, находящиеся под его контролем, для использования на следующем этапе его поведения. С другой стороны, человек, органы чувств которого не усилены соответствующим приемником, не замечает радиоволн, поскольку их присутствие "не позволяет" совершать какие-либо действия, находящиеся под его контролем.

Если агент что-то осознает, то в некоторых случаях, которые здесь определены как те, в которых агент осознает этот факт, он использует это осознание для адаптации своих действий. Таким образом, сознание требует

осознанности, но дает больше: возможность адаптировать способ выбора следующего шага в поведении. К сожалению, прямое определение сознания в этих терминах было бы невозможно без понимания "разума" агента. Поэтому мы прибегаем к определению его в терминах повторяющегося осознания. Таким образом, агент обладает сознанием, если он осознает свою осведомленность [3.24].

Например, птица замечает птенцов в гнезде, потому что она не возвращается прямо в гнездо, как обычно, а приспособливается, сначала садясь на ближайшую ветку. Она осознает присутствие стаи, потому что корректирует свою траекторию, усредняя скорости своих соседей по стае [3.5]. Таким образом, она не просто осознает, но и обладает сознанием в обоих случаях.

Эта интуиция распространяется на многие популярные трактовки человеческого сознания. Мы ссылаемся только на одну из них, предложенную в [3.6], в которой осознание человеком чего-либо означает "способность сообщать об этом". С нашей точки зрения, отчетность требует осознания того, что происходит, чтобы иметь возможность сообщать об этом, но, более того, выбирая, о чем сообщать, человек демонстрирует осознание этого.

При таком подходе осознанность необходима для адаптации, для чего мы следуем экоритмическому подходу Вэлианта, который доказывает, что экоритмы [3.26]: «... бывают двух видов: те, которые действуют у индивидуумов, взаимодействующих с окружающей средой, и те, которые действуют посредством генетических изменений на протяжении многих поколений. ... экоритмы также трактуются достаточно широко, чтобы охватить любой процесс взаимодействия с окружающей средой».

В нашем контексте краткосрочную адаптивность можно рассматривать как приспособление агента к окружающей среде, а долгосрочную - как эволюцию. По мере развития системы происходят изменения в наборе

агентов, их действиях и контроле со стороны агентов.

Законы сознания агентов должны определяться без обращения к концепции "состояния ума агента" и, в более общем плане, без антропоморфизма. Наше решение заключается в том, чтобы в максимально возможной степени (хотя и не полностью) использовать поведение, наблюдаемое извне.

Раздел начинается с контекста агентов, действий, функций и адаптивных мультиагентных систем. Рассматриваются свойства осведомленности и выражаются они как в логической, так и в числовой формах. Затем формализуются осведомленность и сознание и доказывается обоснованность законов. После анализа свойств адаптивных мультиагентных систем в нем обсуждается соответствующая работа и делаются выводы.

## **3.2. Сознательные агенты**

В этом разделе дается общее представление об агентах, их действиях и особенностях, о которых они могут знать. Затем рассматриваются адаптивные мультиагентные системы, в которых они работают.

### ***3.2.1. Агенты***

Агенты, которых мы рассматриваем, варьируются от людей, других животных, растений, клеток и организаций до программного обеспечения. Они рассматриваются не изолированно, а как часть некоторой среды обитания, которая может быть населена различными агентами, но имеет внешнюю среду. Термин "окружающая среда" чаще используется для обозначения чего-то внешнего по отношению к субъекту, но мы собираемся придать "внешней среде" другое значение. Внешняя среда рассматривается как фактор по умолчанию.

Действия системы, как правило, контролируются агентами, индивидуально или группами. Агент - это объект в такой системе, контролирую-

щий, по крайней мере, одно действие [3.1].

Из-за универсальности агента мы не можем предполагать, что он демонстрирует рациональность, принятую в логике и, в частности, в динамической эпистемологической логике. Мы не можем обосновать, например, закон, согласно которому, если агент осознает значение  $p$ , которое сильнее  $q$ , то он также осознает  $q$ . Однако что-то в этом роде имеет место, но с учетом корреляции. Мы описываем свойства сознания с помощью законов, но они гораздо слабее, чем привычные логические законы.

### ***3.2.2. Действия***

Действия, выполняемые агентами, либо завершаются, либо продолжаются и, как правило, являются реактивными. Первые описываются постулатом, включающим состояние до, ввод, состояние после и вывод. Затем определяется предварительное условие, которое сохраняется в состоянии до и вводится, если есть состояние после, и выводится, удовлетворяющий последнему условию. Последние типы действий описываются понятиями безопасность и жизнеспособность. Мы стараемся не различать эти два стиля, думая о продолжающемся действии как об повторении завершающегося действия, возможно, навсегда.

Наши описания действий не обязательно являются алгоритмическими или даже вычислимыми, но все они основаны на состоянии. Это позволяет включить точку зрения [3.12] о том, что квантовая редукция является примитивной в любом подходящем для человека экоритмическом языке.

Мы используем следующие обозначения, касающиеся контроля действий агента. Оставленный здесь неформальным, он был формализован для программного обеспечения [3.21]. Предположим, что заданы множества агентов и действий.

**Обозначение 1 (область действия).** Областью действия операций  $act:Actions$  является набор агентов, участвующих в его активации:

$\text{ambit}(\text{act}) := \{a : \text{Agents} \mid a \text{ обладает некоторым управлением в act}\}.$

Множество действий, в которых  $a \hat{1}$  «обладает некоторым управлением», обозначим как

$A_a := \{\text{act} : \text{Actions} \mid a \in \text{сфере действия (act)}\}.$

### 3.2.3. Особенности

Объекты в среде обитания агента, которые могут влиять на его поведение, мы называем особенностями.

Например, к особенностям среды обитания человека могут относиться воспоминания о прошлых днях рождения, видение единорога, (запомнившийся) сон, социальные условности, радиоволны, изменение климата и взаимодействие с домашними животными и другими людьми.

В целом, определение признака основывается на знаниях, относящихся к конкретной предметной области. Признаки позволяют нам выражать концепции в терминах наблюдаемого поведения (а не состояния ума).

**Обозначение 2 (особенность).** Особенность - это то, что может влиять на поведение системы. Особенности бывают разных типов и зависят от знаний предметной области, как показано в приведенных выше примерах. Например, пространство  $F$  всех функциональных возможностей для системы  $\text{humans}$  может быть определено синтаксически:

$\text{Basic} := \{\text{Привычка, Напоминание, Представление, Воображение}\}$

$\hat{A} ::= \text{Basic} \mid \uparrow \hat{A} \mid \hat{A} \& \hat{A} \mid \hat{A} \text{ } \frac{3}{4} \text{ } \hat{A} \mid \hat{A} \text{ } \frac{3}{4} \text{ } \hat{A} \mid A_a \hat{A}$

Утверждение "признак  $f$  возникает в момент времени  $t$ " записывается как  $f \downarrow t$ . Тогда в табл. 3.1 определяются логические операции, описанные выше.

Конечно, последствия  $\frac{3}{4} \hat{A}$  и  $\hat{A} \text{ } \frac{3}{4} \hat{A}$  сохраняются и в том случае, если их предшественники терпят неудачу.

Отсутствие  $f$  - это то же самое, что и появление  $f$ :  $\sim$  - это инволюция.

Однако агент может не знать ни о  $f \downarrow t$ , ни о  $(\sim f) \downarrow t$ .  $\&$  является коммутативным, ассоциативным и идемпотентным.  $\frac{3}{4} \textcircled{\&}$  и  $\frac{3}{4} \textcircled{\vee}$  являются транзитивными. Как обычно, дуальность (закон де Моргана) может быть использована для определения аналога дизъюнкции как  $\sim((\sim f) \& (\sim g))$ , представляющего собой вхождение по крайней мере одного из  $f$  и  $g$ .

Таблица 3.1

Логические операции в нотации работы

$(\dagger f)^- t := \emptyset(f^- t)$	$f$ не возникает в момент $t$
$(f \& g)^- t := (f^- t) \dot{\cup} (g^- t)$	$f$ и $g$ возникают в момент $t$
$(f \frac{3}{4} \textcircled{\&} g)^- t := (f^- t) \textcircled{\supset} (g^- t)$	$g$ произойдет в момент $t$ , если $f$ произойдет
$(f \frac{3}{4} \textcircled{\vee} g)^- t := (f^- t) \textcircled{\supset} (\$u^3 t : g^- u)$	$g$ произойдет вместе или после $f$ в момент $t$

Не все признаки актуальны для агента в конкретный момент времени, а те, которые есть, имеют разный уровень значимости. Для нас признаки, обнаруженные в среде обитания, кажутся доминирующими, что обычно оправдано с точки зрения выживания. Но мы также хорошо осведомлены о социальных условностях и опыте, которые мы относим к категории "запоминаемых".

Говорят, что функция **En** "разрешает" любое действие, предварительное условие которого она устанавливает. Нашим системам также требуется более общая версия, в которой предварительное условие в конечном итоге устанавливается.

**Определение 3.1 (Разрешения).** Предположим, что  $\text{act}$  - это действие. Мы говорим, что особенность  $f : F$  разрешает  $\text{act}$ , если она устанавливает предварительное условие  $\text{act}$  поточечно по времени,

$$f \mathbf{En} \text{ act} := f \frac{3}{4} \textcircled{\&} \text{pre}(\text{act})$$

В более общем плане  $f$  в конечном итоге активирует действие, которое будет активировано через некоторое время в будущем:

$$f \in \mathbf{En}^+ \text{ act} := f \text{ } \frac{3}{4} \text{ } \text{\textcircled{R}} \text{ pre}(\text{act})$$

### 3.2.4. Мультиагентные системы

Системы агентов, которые мы рассматриваем, представляют собой адаптируемые мультиагентные переходные системы, но в основе которых лежит понятие контроля и сферы действия. Агенты в наших системах различаются, как мы уже отмечали, по принадлежности к сфере по крайней мере одного действия. Напомним, что среда обитания представлена в качестве агента по умолчанию.

**Определение 3.2 (Система).** Система  $S := (\text{Агенты}, \text{действия})$  состоит из множества агентов, один из которых представляет окружающую среду, и множества действий, каждое из которых имеет определенную область действия. Агенты имеют непересекающиеся пространства состояний и взаимодействуют посредством действий. Таким образом, состояние  $S$  - это непересекающееся объединение состояний агентов, и каждое действие, принадлежащее множеству действий, имеет локус контроля, сферу действия  $(\text{act}) \subseteq \text{Agents}$  и тип для каждого взаимодействия в целом,

$$\text{act} : (\text{States} \times \text{Input}) \leftrightarrow (\text{States} \times \text{Output}) .$$

Агент реагирует на особенности своей среды определенным образом. Считаем, что поведение организма поддается наблюдению, хотя его причины могут быть и не такими.

Функция может выполнять множество действий агента. Но в любой момент агент может выполнять только некоторые из них. Как правило, выбор является рутинным или даже, мы бы сказали, подсознательным. Например, человек может вести машину в обычных условиях на "автопилоте" и осознавать необходимость переключения передачи только в том случае, если происходит что-то непредвиденное, и в этом случае ему нужно реаги-

ровать спонтанно.

Таким образом, агент обычно выбирает действия, если осознает особенности, которые делают их возможными. Но в особых условиях, при "глубоком осознании", которое мы отождествляем с сознанием, агент осознает, что ему известны определенные особенности, и должен адаптировать свой выбор действия. Таким образом, мы отождествляем осознание какой-либо особенности с осознанием осознанности этой особенности и считаем, что это приводит к тому, что агент адаптирует свой выбор действий.

Наши системы адаптируются на двух уровнях. На системном уровне это результат "долгосрочных" изменений; например, птицы адаптируются к изменению климата в своей среде обитания. На уровне агентов это обусловлено не только постепенной реакцией на долгосрочные изменения, но и межагентскими, социальными взаимодействиями.

### 3.3. Осведомленность

Мы рассматриваем логические правила и числовые неравенства для определения  $(A_a f) \downarrow t$  агентом  $a$  признака  $f$  в момент времени  $t$ . Повсюду мы рассматриваем только одного агента и ищем правила, сводящие осознание сложного признака к осознанию более простых признаков, принимая во внимание последствия, согласно теории соответствия модальной логики, для семантики.

Например, в логической модели осознание  $f$  в момент  $t$  должно подразумевать, что утверждение  $f \in t$  выполняется:

$$(A_a f) \downarrow t = f \downarrow t . \quad (3.1)$$

Естественно, обратное не работает: агент осведомлен только об определенных особенностях своей среды обитания.

Правило (3.1) - закон Т модальной логики, вытекает из теории соответствия, что отношение доступности в семантике Крипке является реф-

лексивным. Это также подразумевает, что для того, чтобы а стало известно о  $f \downarrow t$ , не требуется временной задержки.

Аналитически, если а известно  $f \downarrow t$ , то сила этого знания должна равняться силе  $f \downarrow t$  (в одно и то же время). Это записывается как

$$|(A_a f) \downarrow t| = |f \downarrow t|. \quad (3.2)$$

**Совпадение.** Напомним, что  $(f \& g) \downarrow t = (f \downarrow t) \wedge (g \downarrow t)$ . Поэтому эквивалентно ли осознание  $(f \& g) \downarrow t$  осознанию  $f \downarrow t$  и  $g \downarrow t$  независимо?

Первое справедливо, если  $(f \& g) \downarrow t$  допускает некоторое действие. Но второе справедливо, если каждая функция в отдельности допускает действие, которое не обязательно является одним и тем же из-за обычной разницы между точечным и однородным поведением, получаемым при замене кванторов. Таким образом, мы ожидаем, что сохранится только подтекст:

$$(A_a f) \downarrow t \wedge (A_a g) \downarrow t \Rightarrow (A_a (f \& g)) \downarrow t. \quad (3.3)$$

Слегка надуманный контрпример к обратному предложен агентом, который требует от пользователей двухфакторной аутентификации, прежде чем предоставить им доступ к некоторой информации. Он предоставляет доступ пользователю, если у него есть функция, состоящая из идентификатора и двух паролей. Но если ввести идентификатор и единственный пароль, это ничего не даст. Таким образом, обратное к (3.3) не выполняется.

Для сравнения, если бы требовалась только однофакторная аутентификация, то, конечно, было бы справедливо (3.3). Но ни в том, ни в другом случае агент не обязательно был бы в сознании; он реагирует, а значит, осознает, но со строгой стратегией. Брандмауэр, который требует двухфакторной аутентификации и который "атакует" пользователей, отправляющих одиночные пароли, был бы осведомлен, если бы его атака была разработана заранее, что указывает на гибкость реагирования.

Интуитивно понятно, что степень осознания одновременной комбинации должна быть ограничена сверху более сильными значениями  $f$  и  $g$ , а

снизу - более слабыми.

$$\text{Min}\{|(A_a f)t|, |(A_a g)t|\} \leq |(A_a(f \& g))t| \leq \text{Max}\{|(A_a f)t|, |(A_a g)t|\} \quad (3.4)$$

**Следствие.** Фундаментальный закон К модальной логики:

$$\mathbb{W} \dot{\cup} \mathbb{W}(f \supset g) \supset \mathbb{W}g$$

В терминах  $A_a$ , который полагается на то, что агент оценивает, когда одна функция сильнее другой, что нереально для агентов в целом. Но замена первого вхождения  $\Rightarrow$  на  $\frac{3}{4} \textcircled{K}$  приводит к правдоподобному логическому правилу:

$$(A_a f)^- t \dot{\cup} (A_a(f \frac{3}{4} \textcircled{K} g))^- t \supset A_a(g)^- t \quad (3.5)$$

По сравнению с (3.3), мы ожидаем, что осознание  $f \downarrow t$  и  $g \downarrow t$  подразумевает осознание  $(f \frac{3}{4} \textcircled{K} g)^- t$ :

$$(A_a f)^- t \dot{\cup} (A_a g)^- t \supset (A_a(f \frac{3}{4} \textcircled{K} g))^- t \quad (3.6)$$

Для уверенности, рассуждая так же, как и для параллелизма,

$$\begin{aligned} \text{Min}\{|A_a \sim f)^- t|, |A_a \sim g)^- t|\} &\leq |(A_a(f \frac{3}{4} \textcircled{K} g))^- t| \leq \\ &\leq \text{max}\{|A_a \sim f)^- t|, |A_a \sim g)^- t|\} \end{aligned} \quad (3.7)$$

**Отсутствие и двойственность.** Признаки  $f$  и  $\sim f$  не могут встречаться одновременно по смыслу  $\sim$ . Таким образом, в логической модели агент не может знать как о  $f \downarrow t$ , так и о  $(\sim f) \downarrow t$ :

$$(A_a f) \downarrow t \Rightarrow \neg((A_a \sim f) \downarrow t). \quad (3.8)$$

Модальный дуализм к  $A_a$  обозначим  $\nabla_a$ .

**Определение 3.3 (дуализм).** Если в момент времени  $t$  агент  $a$  не знает об отсутствии функции, то эта функция считается выполнимой с точки зрения  $a$ :

$$(\nabla_a f) \downarrow t := (\sim (A_a \sim f) \downarrow t) \downarrow t.$$

Наша логическая версия закона модальной логики D следует из выражения (3.8):

$$(A_a f) \downarrow t \Rightarrow (\nabla_a f) \downarrow t. \quad (3.9)$$

Согласно теории соответствия, доступность в семантике Крипке является последовательной. Численно, исходя из этого, мы ожидаем:

$$|(A_a f)\downarrow t| \leq |(\nabla_a f)\downarrow t|. \quad (3.10)$$

**Сознание.** Сознание подразумевает осведомленность по определению, подтвержденному выражением (3.1):

$$(A_a(A_a f)\downarrow t)\downarrow t \Rightarrow (A_a f)\downarrow t. \quad (3.11)$$

Но не наоборот, как в случае (3.1), поскольку тогда не было бы разницы между осведомленностью и сознанием. Согласно теории соответствия, доступность в семантике Крипке не является транзитивной.

Численно, исходя из этого, мы ожидаем:

$$|(A_a(A_a f)\downarrow t)\downarrow t| \leq |(A_a f)\downarrow t|. \quad (3.12)$$

**Время.** Осознание функции  $f\downarrow t$  со временем исчезает, если ее каким-либо образом не обновить. Таким образом, сила осознания  $f$  в будущем в наибольшей степени равна силе сейчас, если только осознание не обновляется. Мы ожидаем, что будет выполнено неравенство:

$$\begin{aligned} &\text{при } \neg(A_a f)\downarrow u, \\ &\forall u > t : |(A_a f)\downarrow u| \leq |(A_a f)\downarrow t|. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Если  $(A_a f)\downarrow u$ , то неравенство выполняется только в том случае, если  $(A_a f)\downarrow t$  выполнено тоже, и в этом случае выполняется равенство.

### 3.4. Надежность

В этом разделе мы продолжим рассмотрение с точки зрения отдельного агента и определим простую модель, определим осведомленность о ней и покажем, что вышеприведенные выражения верны. Мы записываем  $T$  для временной области, которая, как мы теперь предполагаем, равна  $N$ .

Напомним, что агент не осведомлен обо всех особенностях своей среды обитания, но о тех, о которых он осведомлен, он осведомлен с определенной степенью достоверности. Например, в Определении 3.2 можно ранжировать значения основных характеристик по умолчанию для людей

$$|\text{Привычка}| > |\text{Напоминание}| > |\text{Представление}| > |\text{Воображение}|. \quad (3.14)$$

Действительно, наше выживание зависит от быстрой реакции на угрожающие особенности нашей среды обитания, но мы руководствуемся памятью, в частности, о нравах общества. На данный момент мы упрощаем и рассматриваем особенности как имеющие одинаковую силу, используя силу признаков для определения силы осознания.

Сила признака в момент времени  $t$  равна 1, если он возникает в момент времени  $t$ , а в противном случае обратно пропорциональна промежутку времени до  $t$  с момента его возникновения.

**Определение 3.4** (Сила). Промежуток времени до или в момент времени  $t$ , когда в последний раз возник признак  $f$ , является минимальным количеством периодов времени:

$$t(f,t) := \min\{t-n \mid t^3 n, f^- n, " m: (n, t] \hat{=} \emptyset(f,m)\}$$

Таким образом, количество периодов времени равно нулю, если  $f \downarrow t$ . Считаем, что оно равно  $\infty$ , если  $f$  не произошло до момента  $t$ .

Сила  $|f \downarrow t|$  признака  $f$  в момент времени  $t$  определяется как обратно пропорциональная продолжительности времени  $\tau(f,t)$ :

$$|f \downarrow t| := (1 + \tau(f,t))^{-1},$$

где как обычно  $1 + \infty = \infty$  и  $\infty^{-1} = 0$ . Таким образом, значение равно 1, если признак встречается в момент  $t$ .

Мы также принимаем соглашение о силе преемника и предшественника, которое будет использовано ниже. Предположим, что сила  $d = (1 + e)^{-1}$ , где  $e \hat{=} \mathbb{N}^\infty$ . Тогда преемником будет  $d^+ := e^{-1}$ , если  $e > 0$ , и не определено для  $e = 0$ . Предшественником является  $d^- := (2 + e)^{-1}$  для любого  $e \hat{=} \mathbb{N}$ .

Силу комбинированного признака нелегко выразить в терминах индивидуальных достоинств, поэтому единственными ограничениями являются простые:

**Предположение 3.1** (Сила признака). Сила признака принадлежит отрезку  $[0,1]$  и удовлетворяет следующим условиям:

1.  $(\square) |(\square f, t)| < 1$  тогда и только тогда, когда  $|(f, t)| = 1$
2.  $(\&) \min \{ |(\square f, t)|^+, |(\square g, t)|^+ \} \leq |(f \& g, t)| \leq \max \{ |(f, t)|, |(g, t)| \}$
3.  $(\frac{3}{4} \otimes) |(\square g, t)|^+ \leq |(f \frac{3}{4} \otimes g, t)| \leq |(g, t)|$

Следующая информация формализуется следующим образом. Сначала мы определяем, когда агент узнает о какой-либо функции в данный момент времени, а затем, в этом случае, степень осведомленности.

**Определение 3.5** (Осведомленность). Агент  $a$  знает о функции  $f \hat{\in} F$  в момент времени  $t \hat{\in} T$ , если в этот момент  $f$  выполняет какое-либо действие, по крайней мере частично находящееся под контролем  $a$ :

$$(A_a f) \downarrow t := \exists \text{act} : A_a \hat{\in} (f \mathbf{En} \text{act}) \downarrow t. \quad (3.15)$$

Использование  $\mathbf{En}^+$  вместо  $\mathbf{En}$  дает представление о возможной осведомленности. Набор признаков, о которых  $a$  известно в момент времени  $t$ , обозначается как  $U_a(t)$ .

Степень осознания признака  $f \hat{\in} U_a(t)$  определяется как степень осознания признака  $f$  в момент времени  $t$  (без задержки):

$$|(A_a f) \downarrow t| := |f \downarrow t|. \quad (3.16)$$

**Определение 3.6** (Сознание). Агент  $a$  осознает признак  $f$  в момент времени  $t \hat{\in} T$ , если он осознает  $f$  в момент времени  $t$  и, более того, немедленно осознает, что он осознает:

$$(C_a f) \downarrow t := (A_a((A_a f) \downarrow t)) \downarrow t. \quad (3.17)$$

Сила осознания в момент времени  $u$  - это просто сила этого осознания "осознанности в момент времени  $t$ ":

$$|(C_a f) \downarrow t| := |(A_a((A_a f) \downarrow t)) \downarrow t|. \quad (3.18)$$

Логические законы основаны на следующем результате.

**Предположение 3.2** (Замыкание). Пространство  $A_a(t)$  объектов, о которых  $a$  известно в момент  $t$ , замкнуто под  $\&$  и  $+$ , но не под  $\square$ .

**Доказательство.** Для типичного случая  $\&$  мы рассуждаем:

$$f, g \hat{\in} U_a(t)$$

° Определение  $A_a(t)$

$$A_a(f, t) \dot{\cup} A_a(g, t)$$

° Определение 3.5 понятия осведомленности

$$\$F, G: A_a \hat{\downarrow} (f \mathbf{En} F)^- t \dot{\cup} (g \mathbf{En} G)^- t$$

▷  $f \& g \hat{\downarrow} \dot{A}$ , Н обсуждается ниже

$$\$H: A_a \hat{\downarrow} (f \& g \mathbf{En} H)^- t$$

▷ Определение 3.5 понятия осведомленности

$$A_a(f \& g, t)$$

° Определение  $A_a(t)$

$$f \& g \hat{\downarrow} \dot{A}_a(t)$$

Поскольку оба  $f, g$  происходят в момент  $t$ , они согласованы, поэтому  $f \& g \in \dot{A}$ . Действие  $H$  может быть принято за любой недетерминированный выбор из двух действий, результатом которого является либо  $F$ , либо  $G$ , причем выбор решается на более низком уровне детализации. Например, выбор с вероятностью  $p$  может быть отнесен к окружающей среде, и  $F$  может быть выбран с вероятностью  $p$  (а  $G$  – с вероятностью  $1-p$ ). Любой такой выбор  $H$  удовлетворяет

$$\text{pre}(H) = \text{pre}(F) \vee \text{pre}(G)$$

Таким образом,  $f \& g$  включает  $H$  по мере необходимости. Кроме того,  $H \in A_a$ , потому что

$$\text{ambit}(H) = \text{ambit}(F) \cup \text{ambit}(G)$$

и

$$a \in \text{ambit}(F) \cap \text{ambit}(G).$$

Для  $\sim$  заметим, что если  $F \in A_a(t)$ , тогда по определению 3.1  $f(s) \downarrow t$ .

По определению  $\sim$  и предположению о том, что один из  $f$  и  $\sim f$  может произойти в любое время,  $(\sim f) \downarrow t$  невозможно осуществить, определение обеспечивает  $\sim f \hat{\downarrow} \dot{A}_a(t)$ .

Следующий результат подтверждает правильность как логических, так и числовых законов.

**Утверждение 3.1** (Корректность). Законы (3.1)-(3.13) из раздела 3.3 остаются в силе.

**Доказательство.** Логические законы в разделе 3.3 еще не установлены, (3.1), (3.3), (3.5) и (3.6) следуют из простых аргументов с использованием леммы о замыкании.

Для числовых законов типичным является доказательство закона (3.4). Получаем:

$$\begin{aligned} & |(A_a(f\&g))\downarrow t| \\ &= \text{Определение 3.4} \\ & |(f\&g)\downarrow t| \\ &= \text{Определение 3.5 с подходящим } N \\ & 1/(1 + d) . \end{aligned}$$

Теперь  $(f\&g)\downarrow t$ , тогда и только тогда, когда  $f\downarrow t$ , и  $g\downarrow t$  по определению 3.2. Таким образом,  $d$ , время до самого последнего появления как  $f$ , так и  $g$ , ограничено сверху временем до более позднего появления  $f$  и  $g$ , которое равно:

$$|(f\&g)\downarrow t| \leq \max \{|f\downarrow t|, |g\downarrow t|\} = \max \{|(A_a f)\downarrow t|, |(A_a g)\downarrow t|\}.$$

Выражение ограничено снизу первым появлением либо  $f$ , либо  $g$ , что на единицу больше, чем самое последнее появление либо  $\sim f$ , либо  $\sim g$ :

$$|(f\&g)\downarrow t| \geq \min \{|(\sim f)\downarrow t|^+, |(\sim g)\downarrow t|^+\} = \min \{|(A_a \sim f)\downarrow t|^+, |(A_a \sim g)\downarrow t|^+\}$$

Мы вывели (3.4).

### 3.5. Адаптивность

В этом разделе мы рассмотрим, в каких системах работают агенты.

Наши агенты адаптируются как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе и, как уже отмечалось, полностью соответствуют принципам [3.26]. Краткосрочную, повседневную адаптацию мы рассматриваем

как приспособление, а долгосрочную адаптацию - как эволюционную. Но наш подход поддерживает и то, и другое, без какой-либо необходимости в обратном ограничении, которое подразумевало бы некоторое ограничение эволюции, что кажется неправдоподобным.

Что касается мультиагентных систем, то корректировки могут быть включены в описание системы, поскольку они предсказуемы, и поэтому состояние может быть расширено, чтобы включить изменения. Это аналогично тому, что агенту, находящемуся в сознании, не нужно менять свой способ выбора следующего шага в поведении. Однако эволюция непредсказуема, и поэтому состояние должно быть расширено, а действия обновлены. В ретроспективе в любой момент текущую систему можно рассматривать как более всеобъемлющую, но неадаптивную систему, использующую конструкцию Майхилла-Нерода [3.18] для построения состояний как классов эквивалентности последовательностей действий.

Учитывая ретроспективное представление адаптивной системы как неадаптивной системы, изменения удовлетворяют "причинно-следственному" инварианту. В физическом пространстве-времени событие  $x$  может повлиять только на те события в его будущем конусе  $C^+(x)$ . События в прошлом конусе  $C^-(x)$  требуют "обратной причинности", а события в будущем, но за пределами  $C^+(x)$ , требуют сверхбыстрой связи.

Для адаптивных систем реалистичное условие причинно-следственной связи является более сложным, поскольку связность неоднородна, и некоторые коммуникации являются синхронными, в то время как другие - асинхронными. Поскольку отношение  $\mathbf{En}^+$ , определяющее возможную работоспособность, является транзитивным, его можно использовать для определения аналога конусов.

**Определение 3.7** (Конусы). Если  $act \hat{I}$  Действия, то будущие и прошлые конусы  $act$  состоят соответственно из всех действий, которые он в конечном итоге разрешает, и которые в конечном итоге делают его воз-

МОЖНЫМ:

$C^+(\text{act}) : \{\text{act}' \hat{I} \text{ Действия} \mid \text{pre}(\text{act}) \mathbf{En}^+ \text{act}'\}$

$C^-(\text{act}) : \{\text{act}' \hat{I} \text{ Действия} \mid \text{pre}(\text{act}') \mathbf{En}^+ \text{act}\}$

Агент стабилен в какой-то момент эволюции адаптивной системы, если дальнейшие взаимодействия не приводят к его изменению: впоследствии его пространство состояний и действия, полностью находящиеся под его контролем, остаются неизменными.

Наши адаптивные системы удовлетворяют инварианту, согласно которому изменения происходят только в том случае, если они ограничены будущими конусами.

### **3.6. Окружение и основные результаты**

Были предложены логические законы для осознания и, следовательно, для сознания (рассматриваемого как осознание осознанности), а также неравенства для его силы. Было показано, что они верны, несмотря на рефлексивность, необходимую для сознания, в очень простой модели.

Движущая сила интуиции заключалась в том, что осознание "позволяет" действиям формировать следующий поведенческий шаг агента, в то время как сознание предоставляет агенту возможность адаптировать свой способ принятия решения о таком поведении. Кажется трудным сформулировать эти идеи в наблюдаемых (то есть фальсифицируемых) терминах, поэтому мы прибегли к законам и неравенствам.

Мы не знаем ни о какой подобной работе, основанной на законах или на выборе следующего поведенческого шага. Известные работы сосредоточены на архитектурных моделях, которые демонстрируют сознание, и в основном для людей [3.19]. Важными примерами являются теория глобального рабочего пространства (GWT) [3.2] и связанная с ней сознательная машина Тьюринга (СТМ) [3.4]. Они основывают выбор из множества альтернатив одной для осознания на ранжировании, в то время как наш

подход менее специфичен: агент осознает, если ему требуется или предоставляется возможность адаптировать протокол к своему поведению. Интересной альтернативой, полностью основанной на плотности сети, является [3.10, 3.11].

Ранние работы, основанные на вычислениях, основаны на общей аналогии между разумом и компьютером [3.16]. В этих терминах запоминаемые и подсознательные функции можно рассматривать как нечто вроде оперативной памяти. Когда функция заново "загружается" из памяти, она попадает в "локальное хранилище" и, таким образом, становится доступной агенту. Это обеспечивает вычислительную аналогию с кэшированием, которое по-разному было реализовано GWT и СТМ.

Истоки вычислительного подхода к эволюции систем восходят к экспериментам [3.3, 3.20], ранним и ограниченным предшественникам экоритмов [3.26]. Важной в эволюционном плане будет работа по вычислительному эволюционному восприятию (СЕР) [3.13], которая опровергает наивную интерпретацию "то, что мы видим, - это то, что находится снаружи", рассматривая ее применение для наблюдателя. Аналогичные идеи будут применимы к произвольному агенту и всем его функциям и будут необходимы для дальнейшей количественной оценки нашего подхода.

Теория информационной интеграции ПТ [3.25], обеспечивает измерение сознания, но ввиду вычислительной сложности его оценки, в настоящее время интерес, по-видимому, проявляется к его моделированию. Чтобы быть моделью того, что делает мозг, это должно быть выполнимо с точки зрения вычислений. В теории адаптивных систем существуют работы по осознанию [3.14, 3.15].

Универсальность наших агентов означает, что они не обязательно рациональны, поэтому мы не можем использовать работу над динамической эпистемологической логикой. Смягченные понятия модальной осведомленности, необходимые для рассуждения логическими агентами, кото-

рым не хватает логического всеведения и которые обладают лишь ограниченными вычислительными способностями, были введены в [3.7]. Они уточняют идею [3.17] о "явном" и "неявном" убеждении (последнее является логическим завершением первого) и показывают, как достичь результата в рамках семантики Крипке, адаптированной для учета времени.

Наш подход можно рассматривать как формализующий и распространяющий на агентов подход [3.6].

В этой работе есть несколько недостатков. Предполагалось, что объекты имеют одинаковую силу, хотя при определении силы объекта им просто присваиваются веса в зависимости от их основных составляющих, с учетом (3.14). В определении осведомленности об особенностях не было предпринято никаких попыток связать особенности, что на самом деле кажется вероятным, но потребовало бы неизвестной в настоящее время структуры на  $F$ .

Рассматривался один агент. На самом деле разные агенты обладают разными преимуществами, которые могут быть включены в определение силы осознания, данное  $A$ . Этот вес агента будет меняться в зависимости от эволюции, в ходе которой виды будут вести антиэнтропийный поиск ниши с более низкой потенциальной энергией, но при этом затрачивать как энергию, так и время. Сознание разрушает барьер и инициирует процесс осознания, увеличивающий энтропию. Связь этого со "свободной энергией" [3.22, 3.23] является темой для дальнейшей работы, которая будет включать достижения в понимании эволюции осознанности [3.9] и сознания [3.8].

При определении сознания мы не рассматривали осознание более высокого порядка, чем степень 2. Одним из преимуществ нашего подхода является возможность использовать его для объяснения подсознательного и аномального поведения, такого как слепота [3.24].

Включение более общего, нелинейного представления о времени

сделало бы теорию более реалистичной, равно как и включение вероятности действий и наблюдения о том, что сознание, по-видимому, не является независимым для каждой характеристики, а группируется по типу характеристики. Наконец, теорема, подразумеваемая в разделе 3.5 об адаптивной системе, представленной в виде системы, может быть формализована, а критерии моделирования могут быть использованы для установления сознания агента.

### **Источники к главе 3**

- 3.1. Atamian, H.S., Creux, N.M., Brown, E.A., Garner, A.G., Blackman, B.K., Harmer, S.L.: Circadian regulation of sunflower heliotropism, oral orientation, and pollinator visits. *Science* 353(6299), 587–590 (2016)
- 3.2. Baars, B.J.: *A Cognitive Theory of Consciousness*. CUP (1998)
- 3.3. Barricelli, N.A.: Work from the 2nd half of the 50s at Princeton IAS summarised in Chapter 7 of *G. Darwin Among the Machines*. Penguin, Dyson (1997)
- 3.4. Blum, M., Blum, L.: A theoretical computer science perspective on consciousness, 2020. [arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2011/2011.09850.pdf](https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2011/2011.09850.pdf)
- 3.5. Cucker, F., Smale, S.: Emergent behaviour in flocks. *IEEE Trans. Autom. Control* 152(5), 852–862 (2007)
- 3.6. Dehaene, S.: *Consciousness and the Brain*. Penguin (2014)
- 3.7. Fagin, R., Halpern, J.Y.: Belief, awareness and limited reasoning. *Artif. Intell.* 34, 39–76 (1988)
- 3.8. Ginsburg, S., Jablonka, E.: *The Evolution of the Sensitive Soul: Learning and the Origins of Consciousness*. MIT Press, Cambridge (2019)
- 3.9. Graziano, M.S.A.: Speculations on the evolution of awareness. *J. Cogn. Neurosci.* 26(6), 1300–1304 (2014)
- 3.10. Grindrod, P.: On human consciousness: a mathematical perspective. *Netw. Neurosci.* 2(1), 23–40 (2017)
- 3.11. Grindrod, P., Lester, C.: Cortex-like complex systems: what occurs within?, June 2020. [www.researchgate.net/publication/341901669](https://www.researchgate.net/publication/341901669)
- 3.12. Hameroff, S.: How quantum brain biology can rescue conscious free will. *Front. Integr. Neurosci.* 6, 93 (2012)
- 3.13. Hoffman, D.D., Singh, M.: Computational evolutionary perception. *Perception* 41, 1073–1091 (2012)
- 3.14. Hörlzl, M., Wirsing, M.: Towards a system model for ensembles. In: Agha, G., Danvy, O., Meseguer, J. (eds.) *Formal Modeling: Actors, Open Sys-*

tems, Biological Systems. LNCS, vol. 7000, pp. 241–261. Springer, Heidelberg (2011).

3.15. Höllzl, M., Gabor, T.: Reasoning and learning for awareness and adaptation. In: Wirsing, M., Höllzl, M., Koch, N., Mayer, P. (eds.) Software Engineering for Collective Autonomic Systems. LNCS, vol. 8998, pp. 249–290. Springer, Cham (2015).

3.16. Johnson-Laird, P.N.: The Computer and the Mind. Harvard University Press(1988)

3.17. Levesque, H.J.: A logic of implicit and explicit belief. In: Proceedings AAAI-84, Austin, TX, pp. 198–202 (1984). Revised and expanded: Lab. Tech. Rept. FLAIR, #32, Palo Alto, CA, 1984

3.18. Lewis, H.R., Papadimitriou, C.H.: Elements of the Theory of Computation, 2nd edn. Prentice-Hall, Hoboken (1998)

3.19. Oxford Mathematics of Consciousness and Applications Network. [omcan.web.ox.ac.uk](http://omcan.web.ox.ac.uk)

3.20. Ray, T.S.: An approach to the synthesis of life. In: Boden, M.A. (ed.) (Without Appendices) The Philosophy of Artificial Life. Oxford Readings in Philosophy, pp. 111–145. OUP (1996)

3.21. Sanders, J.W., Turilli, M.: Dynamics of Control. UNU-IIST Report 353, March 2007

3.22. Solms, M., Friston, K.: How and why consciousness arises: some considerations from physics and physiology. *J. Conscious. Stud.* 25, 202–238 (2018)

3.23. Solms, M.: The Hidden Spring: A Journey to the Source of Consciousness. W.W. Norton & Co. (2021)

3.24. Stanford Encyclopedia of Philosophy. The Metaphysics Research Lab, Center for the Study of Language and Information (CSLI), Stanford University, January 2014

3.25. Tononi, G.: An information integration theory of consciousness.

BMC Neurosci. 5, 42 (2004). 22 pages

3.26. Valiant, L.: *Probably Approximately Correct: Nature's Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World*. Basic Books (2013)

## **4. Практическое управление проектами и уровнем зрелости организационной системы**

### **4.1. Разработка алгоритма совершенствования стратегии повышения уровня зрелости организационной системы при управлении проектами**

В данном разделе рассматривается подход к разработке комплексного показателя, отражающего уровень развития организационных компетенций в управлении проектами, используя описанную в ней модель на основе подхода к повышению качества уровня зрелости, который предусматривает реализацию эффективных мероприятий при минимальных финансовых затратах. Предложенный метод определения уровня зрелости организации в управлении проектами минимизирует субъективность при классификации организации по категориям зрелости, основываясь на оценках по ключевым показателям. Более того, понимание системы формирования интегральной оценки дает организации возможность выработать обоснованную стратегию развития и повышения своего уровня зрелости.

Эффективность подобного подхода была продемонстрирована при анализе рисков инвестиционных строительных проектов, повышения безопасности дорожного движения и ряда других. Однако, для более глубокого понимания требуются дальнейшие исследования в области разработки календарных планов и учета взаимосвязи между различными мероприятиями, чтобы выявить эффект накопления.

#### ***4.1.1. Концепция интегрированной модели организационных аспектов управления проектами***

Сегодня популярным методом определения уровня развития проектных организаций считается анализ их соответствия различным моделям управления проектами, которые определяют, какие организационные ком-

петенции в области управления проектами необходимы для достижения заданного уровня зрелости. Некоторые исследования [4.1] выдвинули концепцию интегрированной модели, которая охватывает все организационные аспекты управления проектами.

Модель, представленная в данном исследовании, позволяет оценивать уровень зрелости организационных способностей управления проектами на основе следующих ключевых составляющих:

Подход к управлению проектами в рамках организационных способностей предприятий (Методы оптимизации деятельности).

Подход к анализу этой частичной характеристики согласуется с принципами, заложенными в модели ОРМЗ целостности.

Факторы, определяющие степень развития этой составляющей, заключаются в углублении эффективности управления проектами;

Улучшение методической составляющей и, как следствие, повышение организационных способностей достигаются посредством непрерывного совершенствования бизнес-процессов, лежащих в основе методики организации работы. Каждый бизнес-процесс в компании должен пройти полный цикл эволюции, включающий этапы стандартизации, количественной оценки, контроля и постоянного совершенствования.

По мере внедрения на предприятии новых подходов к управлению проектами, совершенствуется и методологическая база организационных способностей. Для успешного функционирования проектно-ориентированного предприятия необходимо освоить полный спектр процессов, охватывающих все уровни управления, от операционных до стратегических. Уровень совершенства методической составляющей определяется наличием в методике организации работы процессов, которые регламентируют различные уровни управления на проектно-ориентированном предприятии, начиная от управления отдельными проектами и заканчивая управлением портфелем проектов.

#### ***4.1.2. Технологическая основа управленческих компетенций в проектах (информационные системы управления)***

Успешное внедрение информационных технологий в управлении предприятием прямо пропорционально степени автоматизации проектных процессов. Такое положение достигается тогда, когда автоматизированы ключевые этапы управления отдельными проектами (например, календарно-ресурсное планирование), а также процессы управления портфелем проектов в целом и система документооборота.

Профессиональные навыки, составляющие основу управленческих способностей в проектах (Квалификация персонала организации):

Эта компонента характеризуется своим уровнем развития, который зависит от:

- степени профессиональной квалификации
- степени развитости межличностных навыков
- степени развития личностных качеств
- степени владения контекстуальными навыками

Эффективность организации в профессиональной, межличностной и личностной сферах тесно связана с количеством сотрудников, обладающих способностью успешно реализовывать проекты разной степени сложности, соответствующие направлениям деятельности компании.

Степень усвоения сотрудниками контекстуальных компетенций напрямую влияет на то, насколько их действия соответствуют установленным правилам и процедурам работы. Это означает, что в реальной деятельности сотрудники должны уметь применять все формализованные процессы, которые были разработаны при создании методической основы.

В данной работе рассматривается подход к разработке комплексного показателя, отражающего уровень развития организационных компетенций в управлении проектами, используя описанную в ней модель на основе подхода к повышению качества уровня зрелости, который предусматрива-

ет реализацию эффективных мероприятий при минимальных финансовых затратах.

#### ***4.1.3. Постановка задачи формирования комплексной оценки***

Степень зрелости организации оценивается по трем ключевым компонентам:

1. Эффективность управления проектами во многом зависит от методической составляющей организационных способностей. Оценить ее уровень развития можно по ряду ключевых показателей.

1.1. Уровень достижения совершенства в управлении проектами.

1.2. Область применения применяемых методик управления проектами.

2. Компонента, обеспечивающая информационную и технологическую базу для эффективного управления проектами.

3. Эффективность управления проектами тесно связана с компетентностной составляющей организационных способностей. Степень ее развития оказывает существенное влияние на:

3.1. Показателем профессиональной квалификации служит уровень профессиональных умений.

3.2. Компетенции в сфере межличностных отношений

3.3. Оценка уровня сформированности личностных компетенций

3.4. Уровень, определяемый контекстуальными компетенциями.

Оценку каждого показателя осуществим по четырехбалльной качественной шкале, где уровни представлены как "Низкий", "Удовлетворительный", "Хороший" и "Отлично".

Важно отметить, что в работе [4.1] шкала оценок разделена на четыре части, по 25% каждая, но такой подход не является обязательным. Логично предположить, что можно создать единую оценку уровня зрелости, не привязываясь к четкой градации.

Такая комплексная оценка даст организации возможность более разумно и эффективно определять стратегию развития своей зрелости. Оценка состоит из двух уровней. На первом уровне формируются общие оценки методической и компетентной составляющих, так как их значение вычисляется на основе анализа множества показателей.

Окончательная оценка зрелости рассчитывается на высшем уровне, путем объединения результатов оценки трех компонентных показателей.

Предположим, что как обобщенные оценки, так и итоговая оценка выражаются в системе четырехбалльной шкалы. Для их вычисления мы воспользуемся методом матричных сверток, как описано в [4.2].

Рассмотрим определение общей характеристики методического компонента.

Оценку методической составляющей, которая формируется по двум ключевым показателям, можно получить с помощью единой матрицы. Пример такой матрицы представлен на рис. 4.1.

2	3	2	4	3
2	4	3	3	3
①	②	2	4	3
1	2	3	2	2
1,2 1,1	③	2	4	3

Рис. 4.1. Матрица свертки оценки уровня зрелости

Структура матрицы свертки отображает приоритеты экспертов, специализирующихся на совершенствовании методов управления качеством проектов. Приведенный пример демонстрирует, что эксперты ставят на первое место не количество применяемых проектов, а качество и глубину совершенствования используемых в них процессов.

#### 4.1.4. Определение общей характеристики компетентностного компонента

Ввиду того, что компетентностная составляющая оценивается по четырем критериям, для ее определения необходимо использовать три матрицы свертки. При построении этих матриц также учитываются стратегические направления развития проектного менеджмента.

В случае равного значения личностных и межличностных качеств, матрица компетенций должна иметь симметричную структуру. Однако, если профессиональные навыки считаются более важными, чем содержательные, то матрица будет несимметричной, отдавая предпочтение профессиональным компетенциям [4.3].

В случае, когда профессиональные и ситуационные умения оказываются более значимыми, чем навыки межличностного взаимодействия и личностные качества, то и матрица компетенций будет несимметричной.

В качестве иллюстрации процесса формирования обобщенной оценки компетентностной составляющей, с учётом ранее обсуждённых аспектов, представлен пример на рис. 4.2.

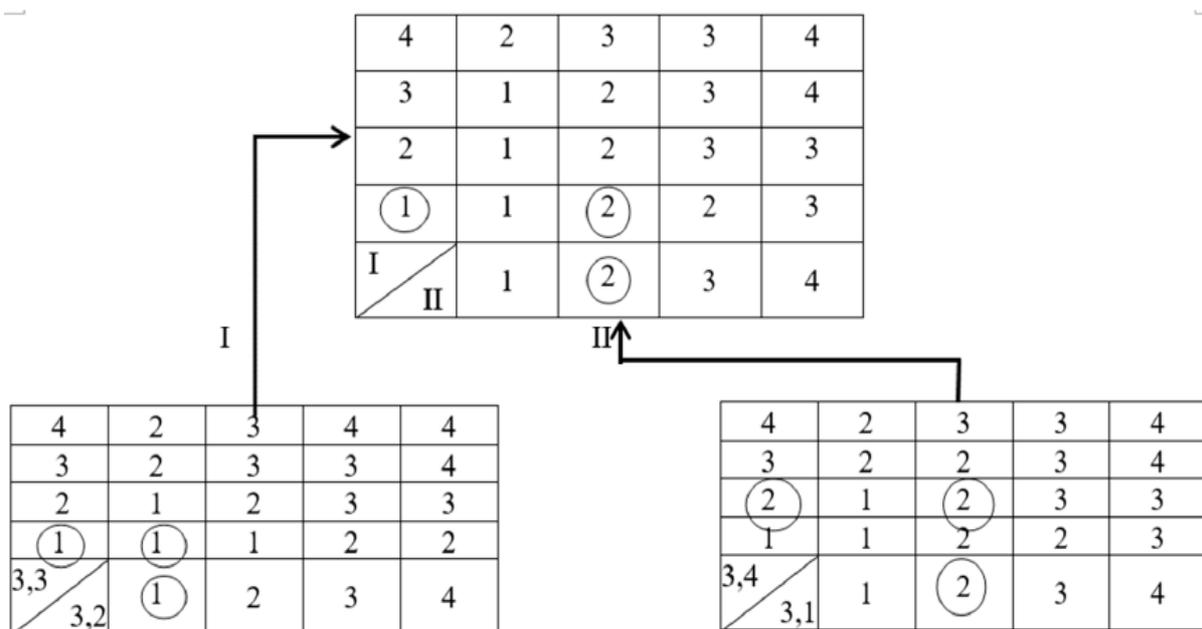


Рис. 4.2. Формирование обобщенной оценки компетентностной составляющей на основе матриц свертки

Рассмотрим процесс создания системы комплексной оценки, которая будет базироваться на трех составляющих. Для ее формирования необходимо использовать две матрицы [4.4]. Учитывая, что методическая составляющая имеет более высокое значение по сравнению с компетентностной, а компетентностная - по сравнению с информационно-технологической, предлагаем вариант системы комплексной оценки, представленный на рис. 4.3.

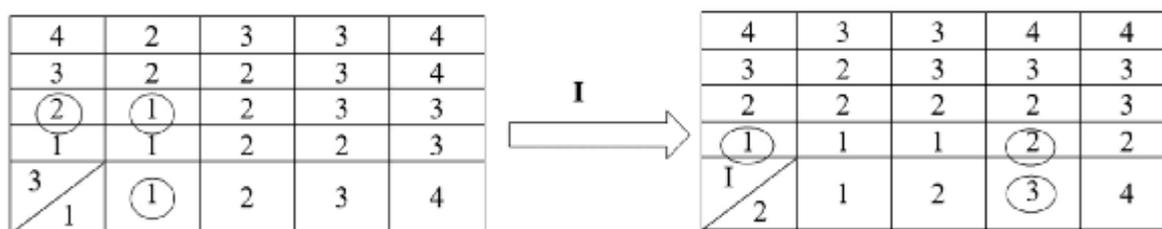


Рис. 4.3. Вариант системы комплексной оценки

В ходе оценки зрелости организации были определены следующие значения ключевых показателей, представленные в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Ключевые показатели уровня зрелости проектной компании

1		2	3			
1.1	1.2	2	3.1	3.2	3.3	3.4
1	2	3	2	1	1	2

На основе данных, представленных в матрице (рис. 4.1), вычисляется обобщенная оценка методического фактора  $Y_1=1$ . На основе матриц, представленных на рис. 4.2, вычисляется обобщенная оценка компетентностного показателя,  $Y_2=2$ . На основании данных, представленных в матрицах из рис. 4.3, вычисляется обобщенная оценка уровня зрелости,  $Y_3=2$ .

Определимся с целью - разработать стратегию, которая позволит повысить текущий уровень зрелости до целевого показателя.

Чтобы улучшить общую оценку, необходимо провести мероприятия

по корректировке оценок по одному или нескольким из семи показателей. Обозначим через  $S_{ij}(K)$  затраты, которые необходимо будет инвестировать в изменение оценки  $j$ -го параметра  $i$ -го блока до уровня  $K$  ( $i=1\dots3$ ).

Рассмотрим величины  $Z_{iK}$ , представляющие собой минимальные вложения, необходимые для поднятия оценки  $i$ -го элемента до уровня  $K$ . Так как вторая часть не обладает показателями второго ранга, то  $Z_{2K}=S_{21}(K)$ .

Рассмотрим алгоритм, который позволит нам вычислить оценки  $Z_{iK}$ , основываясь на заданном значении  $S_{ij}(K)$ . Начнем с установления начальных значений оценок показателей, обозначаемых как  $q_{ij}$ , и расходов  $S_{ij}(q_{ij})$  на поддержание этих начальных оценок, которые для каждого показателя, обозначенного как  $S_{ij}(1)=0$ , равны нулю по определению [4.5].

Анализируем процесс формирования обобщенной оценки для первой составляющей. Табл. 4.2 демонстрирует значения затрат  $S_{ij}(K)$ ,  $j=1,2$ ,  $K=1\dots4$ , которые были определены на основе начальных оценок, представленных в табл. 4.1.

Таблица 4.2

Значения затрат на основе начальных оценок

$K$	1	2	3	4
$S_{ij}(K)$	0	5	15	40
$S_{ir}(K)$	0	3	18	35

Рис. 4.4 демонстрирует матрицу, предназначенную для определения обобщенной оценки первой компоненты. В каждой ячейке матрицы представлены два значения: первое значение, аналогично рис. 4.1, обозначает обобщенную оценку, а второе - стоимость ее вычисления  $Z_{iK}$ ,  $K=1\dots4$ . Минимальные затраты  $Z_{iK}$ , представленные в правом столбце, соответствуют наименьшей стоимости среди всех ячеек, где первое значение совпадает с  $K$ .

4	2;35	3;40	3;50	4;75
3	2;18	2;23	3;33	4;58
2	1;3	2;8	3;18	3;43
1	1;0	2;5	2;15	2;40
1,2 1,1	1	2	3	4

<i>K</i>	$Z_{1k}$
4	58
3	18
2	5
1	0

Рис. 4.4. Обобщённая оценка первой компоненты

Для получения результата используется схожий алгоритм, как показано на рис. 4.5. Стоимости, представленные в табл. 4.3, основаны на начальных оценках, изложенных в табл. 4.1.

Таблица 4.3

Значения затрат для остальных компонент

<i>K</i>	1	2	3	4
$S_{31}(K)$	0	6	20	50
$S_{32}(K)$	0	10	25	50
$S_{33}(K)$	0	10	25	42
$S_{34}(K)$	0	3	8	24

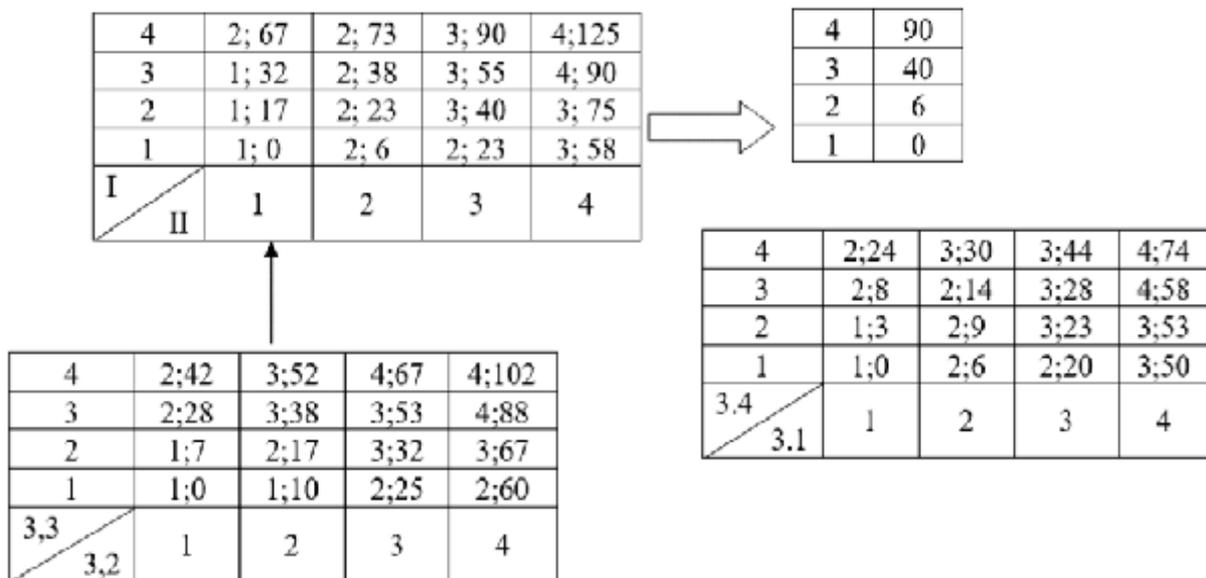


Рис. 4.5. Обобщённая оценка остальных компонент

Используем значения, представленные в табл. 4.4, для параметра *K*.

Таблица 4.4

Значения затрат для второй компоненты

<b>K</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>S<sub>21</sub>(K)</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>21</b>	<b>46</b>

В результате  $Z_{2K}=S_{21}(K)$ ,  $K=1\dots 4$ . Используя полученные данные, можно оптимизировать повышение интегральной оценки  $Y_0=2$  до необходимого уровня (например,  $Y_T=4$ ), минимизируя при этом затраты. Для достижения этой цели достаточно воспользоваться алгоритмом, описанным ранее, применив его к системе формирования интегральной оценки, как показано на рис. 4.3.

Графическое представление результатов расчетов представлено на рис. 4.6. Рис. 4.6 демонстрирует, что для достижения желаемого показателя интегральной оценки минимальные затраты будут равны  $Y=119$ , если, например, целевой уровень установлен на отметке 4.

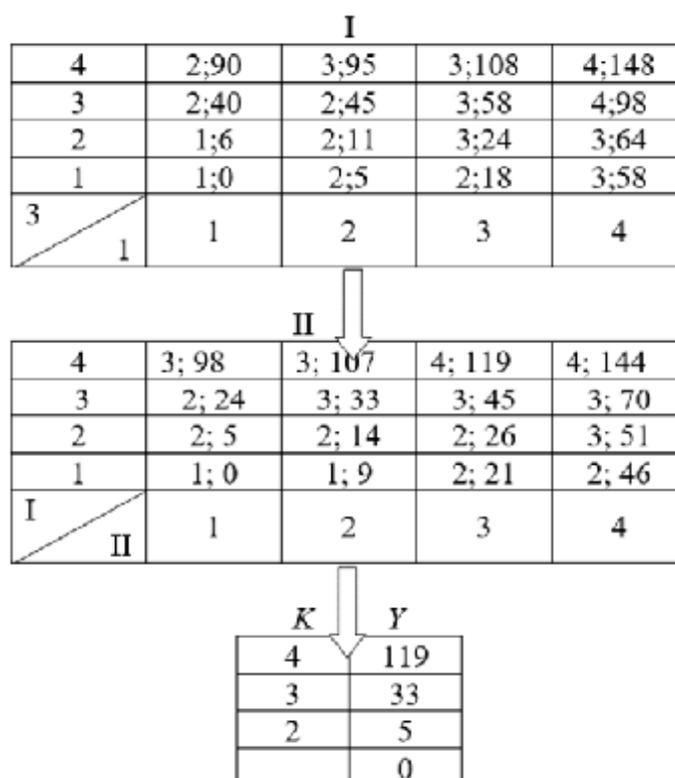


Рис. 4.6. Графическое представление результатов расчетов

Чтобы определить стратегию корректировки показателей, мы используем обратный ход. Связь между клетками (4;119) и (4;98) в матрице I (рис. 4.6) и вариантом (3;21) из табл. 4.4 проявляется в повышении обобщенной оценки вторых компонентов до уровня 3. Вариант (4;98) характеризуется обобщенной оценкой 4 для первой компоненты и 3 для третьей.

После того как мы определили общие оценки по компонентам, переходим к более детальной оценке по каждому показателю. Первая компонента имеет два показателя: 1.1 и 1.2. Анализ рис. 4.4 показывает, что общая оценка 4 для первой компоненты распадается на 4 для показателя 1.1 и 3 для показателя 1.2. Что касается второй компоненты, то ее оценка уже установлена и равна 3. Чтобы определить оценки для третьей компоненты, обратимся к рис. 4.5 и воспользуемся методом обратного хода. Обобщенная оценка 3 соотносится с определенными ячейками в матрицах I и II: (2, 17) и (3, 23) соответственно. Ячейка (2, 17) матрицы I связывает оценку 2 с показателями (3, 2) и (3, 3), а ячейка (3, 23) матрицы II привязывает оценку 3 к показателю (3, 1) и оценку 2 к показателю (3, 4).

В результате мы формулируем стратегию корректировки оценок по указанным показателям (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Стратегия корректировок оценок по показателям

Компоненты	1		2	3			
	1.1	1.2	2.1	3.1	3.2	3.3	3.4
Начальные значения	1	2	3	2	1	1	2
Желательные значения	4	3	3	3	2	2	2

В данном контексте, ключевым направлением развития организации выступает значительное усиление внимания к совершенствованию механизмов управления проектами.

#### ***4.1.5. Итоговая оценка метода определения уровня зрелости организации в управлении проектами***

Предложенный метод определения уровня зрелости организации в управлении проектами минимизирует субъективность при классификации организации по категориям зрелости, основываясь на оценках по ключевым показателям. Более того, понимание системы формирования интегральной оценки дает организации возможность выработать обоснованную стратегию развития и повышения своего уровня зрелости.

Эффективность подобного подхода была продемонстрирована при анализе рисков инвестиционных строительных проектов, повышения безопасности дорожного движения и ряда других. Однако, для более глубокого понимания требуются дальнейшие исследования в области разработки календарных планов и учета взаимосвязи между различными мероприятиями, чтобы выявить эффект накопления.

#### **4.2. Развитие компетенций с использованием матрицы принятия решений**

Стратегическое управление операциями имеет важное значение для выживания бизнеса во все более динамичном мире, в котором постоянно генерируется все больший объем данных. Управление ресурсами, включая компетенции, требует гибких решений, основанных на информации, которая может помочь управленческим командам в выборе профессионалов, способных предложить наилучшие решения старых проблем в дополнение к новым сценариям. Цель работы - представить процедурную структуру, которая помогает менеджерам в выборе компетенций для развития на основе анализа контекстуальной информации и оперативных данных. Предложенная структура была подтверждена с использованием данных органи-

зации, использующей методологию производства мирового класса (WCM), в которой подробно описаны концепции внедрения затрат (CD) и их применение в реальном контексте. Использованный метод заключался в создании структуры и ее применении в тематическом исследовании. В результате удалось показать альтернативу для выбора компетенций, основанную на оперативных данных и информации, а не на интуиции лица, принимающего решения.

#### ***4.2.1. Компетенции и управление, основанное на ресурсах***

В связи с появлением новых технологий и постоянным изменением требований потребителей становятся необходимыми изменения в продуктах и услугах, предлагаемых компаниями, что влияет на то, как организации структурируют свою деятельность и определяют приоритеты. Одной из потребностей, возникающих в результате этого процесса, является обучение работников, чтобы они могли справляться с новыми требованиями, связанными со знаниями о методах и инструментах, таких как использование автоматизации [4.6] и необходимость считывания и анализа данных. В ближайшие годы компании из разных отраслей должны все больше и больше инвестировать в обучение своих сотрудников, стремясь к созданию отличительных компетенций, которые, согласно [4.7], являются организационными навыками, отсутствующими у конкурентов, и которые отвечают потребностям клиентов, являясь, таким образом, источником преимуществ. В работе [4.8] говорится, что выявление сильных и слабых сторон, а также возможностей, создаваемых окружающей средой, и нейтрализация угроз позволяют организациям получить конкурентное преимущество.

Согласно [4.9], “управление, основанное на ресурсах”, указывает на то, что некоторые компании могут получить устойчивое конкурентное преимущество, сосредоточившись на роли ресурсов, которые в основном являются внутренними для деятельности компании. Проще говоря, показа-

тели “выше среднего”, скорее всего, являются результатом ключевых способностей (или компетенций), присущих ресурсам компании, а не ее конкурентной позиции в своей отрасли.

Решение о том, какие компетенции следует развивать, обычно принимается менеджерами, которые основываются на собственном опыте или на внешних тенденциях, влияющих на деятельность компании. В условиях, когда изменения происходят все быстрее и быстрее, эволюция аналитических методов, направленных на развитие навыков, может стать важным способом приведения их в соответствие со стратегией компании, как показано в исследованиях [4.10, 4.11], посвященных видению компетентности как организационного ресурса. Цель этой работы состоит в том, чтобы предложить структурную основу процесса определения компетентности, которая была подтверждена на основе анализа внутренних процессов автомобильной компании, использующей принципы производства мирового класса. Предлагаемая структура направлена на повышение уверенности в своих действиях за счет приведения ее в соответствие со стратегией и контекстом организации, которая ее использует.

Другим вопросом, который рассматривался при построении модели, был используемый подход, который мог бы учитывать качественные или количественные аспекты наблюдаемой ситуации. Согласно [4.12], качественный подход имеет дело с построением теорий, основанных на интерпретации опыта, тогда как количественный подход начинается с подтверждения гипотезы. Среди возможностей использования качественного измерения - непосредственное наблюдение за опытом работников в процессе развития навыков, в то время как количественное измерение требует использования данных, полученных в ходе выполнения операции, которые были определены ранее. Альтернативой этому второму способу является использование финансовых критериев для выбора обучения, отвечающего наиболее насущным операционным потребностям, с учетом потерь, кото-

рые несет компания, и которые должны быть сокращены как можно скорее. Определение затрат, которое, согласно [4.13], является фундаментальной основой программы WCM, позволяющей научно выявлять отходы и потери, что приводит к выбору проектов по совершенствованию внутри организации, используется в этой работе как метод, помогающий выявить пробелы, связанные с компетенциями, которые необходимо развивать в более срочном порядке.

Работа была структурирована в соответствии со следующими разделами:

- На первом этапе исследования был проведен обзор литературы по темам, связанным с представленной проблемой. Поскольку это процесс, который приносит долгосрочные результаты и направлен на получение конкурентных преимуществ, исследуемые темы были проанализированы со стратегической точки зрения. Также были представлены концепции компетентности и распределения затрат, которые уже использовались авторами, поскольку они являются специфическими характеристиками как самого исследования, так и контекста, в котором находится анализируемая компания. Цель этого этапа - представить результаты прошлых исследований, которые могут внести важный вклад в исследование.

- Затем предлагается схема анализа проблемы исследования, основанная на библиографических ссылках в обзоре литературы, с добавлением других источников, подтверждающих предварительные знания авторов. Впоследствии эта структура была проанализирована с использованием данных, предоставленных автомобильной компанией.

- В последней части исследования представлены полученные результаты, а также выводы авторов, сопровождаемые предложениями для дальнейшего анализа.

#### 4.2.2. Возможности для проведения исследований

Этап теоретической подготовки начался с обзора литературы, как показано на рис. 4.7. Этот процесс был проведен с целью определения текущего состояния публикаций по теме, рассматриваемой в данном исследовании. Это позволяет выявить не только возможности для проведения исследований, но и полезные ссылки и открытия, сделанные ранее.

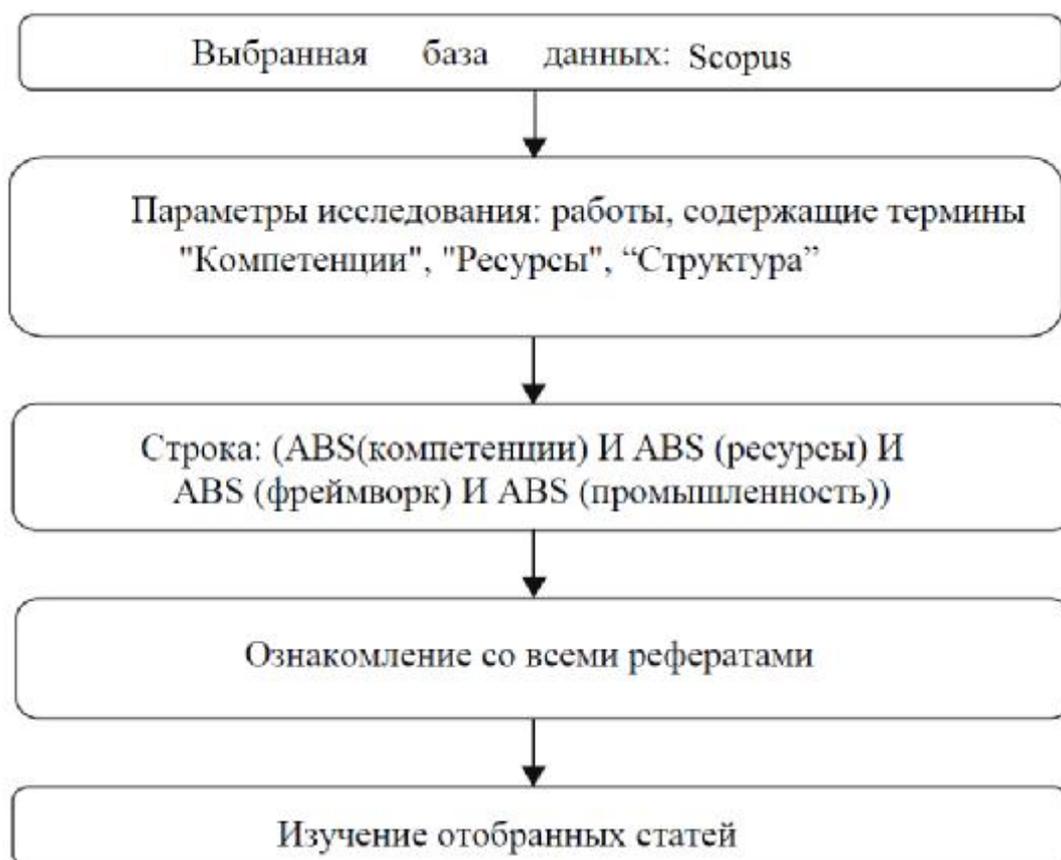


Рис. 4.7. Процесс отбора источников

Для поиска была выбрана база данных Scopus, которая ранее использовалась авторами. Что касается параметров исследования, то после проведения некоторых тестов, которые не дали удовлетворительных результатов, было определено, что в тезисах статей должны содержаться термины “компетенции”, “ресурсы”, “структура” и “автомобилестроение”, принимая во внимание, что целью данной работы является создание системы, которая предусматривает развитие навыков в автомобильной промышлен-

ности. Поиск дал шесть результатов, одним из которых был сборник материалов конференции, но четко определить главу, которая привела к указанному результату, не представлялось возможным, что привело к необходимости исключить ее из портфолио. Были зачитаны резюме остальных пяти результатов, и из них четыре, которые продемонстрировали соответствие теме исследования, были полностью прочитаны авторами, чтобы можно было определить их вклад.

В табл. 4.6 приведены четыре статьи. Приложения и параллельные темы, рассматриваемые в этих работах, также относятся к современным проблемам, таким как устойчивое развитие, технологии и гибкое производство.

Таблица 4.6

Портфолио результатов рецензирования литературы

Заголовок документа	Авторы
Types of green innovations: Ways of implementation in a non-green industry	Calza, F., Parmentola, A., Tutore, I.
Requirements communication and balancing in large-scale software-intensive product development	Pernstål, J., Gorschek, T., Feldt, R., Florén, D.
Principles of ISO management system integration/transition (ISO 9001:2000/ISO 14,001:1996)	Surette, E.
Resource and operations analysis for agile manufacturing system development	Jin, K., Palaniappan, A.

В работе [4.14] рассматривается одна из проблем, связанных с применением "зеленых" инноваций, которая заключается во внедрении такого типа технологий в автомобильную промышленность, которая, как известно, исторически не обладала большим опытом их использования. Это соз-

дает потребность в освоении новых методов работы и организационных навыков. Авторы используют ландшафтную карту зеленых инноваций, матрицу, предложенную в [4.15], для классификации усилий четырех компаний в автомобильной промышленности на рутинные, прорывные, радикальные или архитектурные, в зависимости от необходимых изменений в их бизнес-моделях и технических компетенциях. Авторы рекомендуют создавать партнерские отношения, которые могут облегчить доступ к устойчивым инновациям. В [4.16] авторы приводят в своей работе анализ применения концепции BRASS, которая содержит четыре аспекта, связанные с коммуникацией, в целях улучшения процесса разработки требований в шведской автомобильной компании, что обусловлено ростом производства продуктов, в значительной степени основанных на программном обеспечении. В документе, опубликованном [4.17], рассматриваются правила Международной организации по стандартизации, приводятся инструменты, необходимые для “контролируемой, систематической и прозрачной интеграции” систем менеджмента ISO 9001:2000 и ISO 14,001:1996, в сочетании с практическими примерами. Наконец, в расширенном обзоре, опубликованном в [4.18], говорится, что компании, стремящиеся внедрить гибкое производство, должны включать в свои усилия цепочку поставок, что приводит к необходимости согласования информации и видов деятельности. Эти материалы демонстрируют, что развитие навыков должно анализироваться с использованием хорошо структурированных инструментов, учитывающих возникающие проблемы, которые носят широкий характер и включают требования, которые не всегда контролируются организацией.

Для создания предложенной структуры был проведен поиск определения основных тем, а также их связи с развитием навыков. В работе [4.19] говорится, что развитие нематериальных активов является важным источником конкурентного преимущества, обусловленного возможностью раз-

вития новых отношений с клиентами, с рынком и внутри самой организации. В последнем случае одним из способов осуществления такого рода изменений является мобилизация навыков и мотивации сотрудников для улучшения процессов, что помогает в развитии новых навыков. В исследовании [4.20] были выделены пять категорий компетенций, которые являются: центральными компетенциями, которые помогают в выживании компании; отличительными компетенциями, которые признаются клиентами и отличаются от компетенций конкурентов; организационными компетенциями, которые характерны для бизнес-подразделения; вспомогательными навыками, которые помогают при выполнении других видов деятельности; и, наконец, динамический потенциал, который представляет собой способность организации адаптироваться к своим компетенциям.

Фреймворк, предложенный в [4.21], содержит три категории, которые представляют собой необходимый набор для организаций: компетенции для развития ресурсов и координации, а также компетенции, которые воспринимаются потребителем. Эта классификация демонстрирует, что необходимо учитывать не только внутренние аспекты, но и влияние на поставки тем, кто заинтересован в результатах выполненной работы. В [4.11] предложен подход к анализу ресурсов, разделенный на пять этапов, как показано на рис. 4.8.

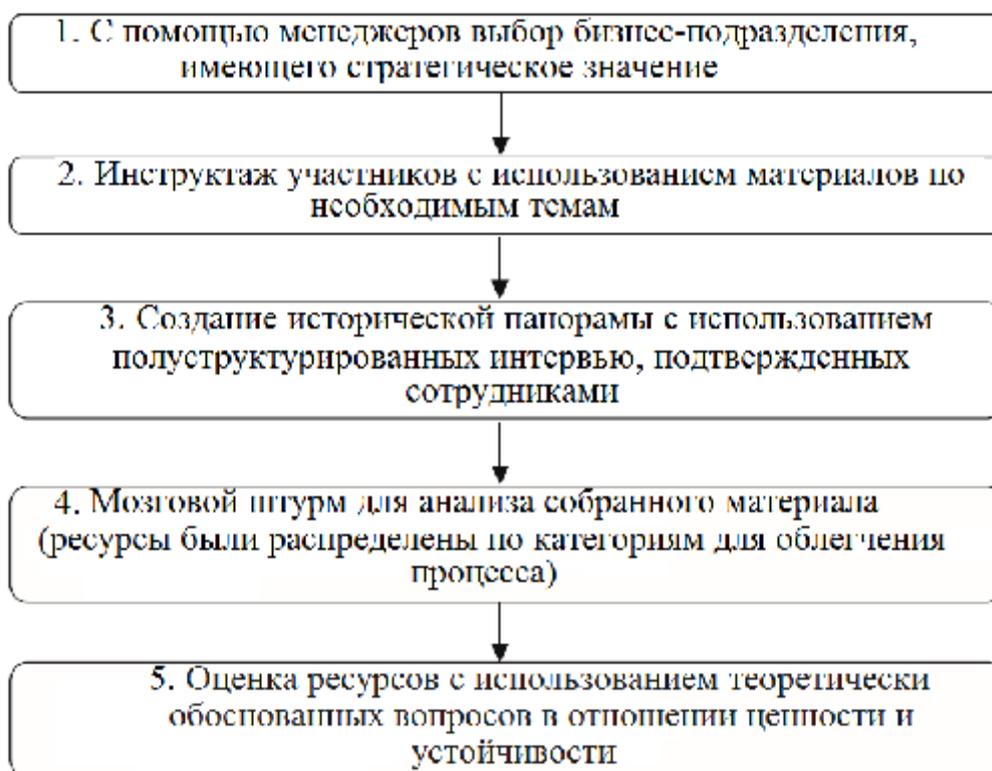


Рис. 4.8. План действий по анализу ресурсов по [4.11]

#### ***4.2.3. Рамочная модель сбора и анализа данных***

Следующим этапом исследования является предложение рамочной модели сбора и анализа данных, позволяющей определить необходимые компетенции, которые распределяются по приоритетам с помощью критериев управления затратами, определенных компанией. В работе [4.21] представлена карта, на которой перечислены несколько переменных, связанных с компетенциями и организационным обучением, а именно: организационные компетенции и возможности, организационное обучение, организационные знания (стратегический ресурс), система убеждений организации, процессы, виды деятельности, ресурсы, распространение и совместное использование информации и знаний, совместное использование результатов и обсуждение, мобилизация и интеграция навыков, а также оперативная стратегия. Это показывает важность наблюдения за данными и организационными структурами, которые влияют на развитие компетен-

ций.

Основываясь на работах [4.10, 4.11], в которых авторы разрабатывают структурированную структуру для определения ресурсов как компетенций внутри компаний, в дополнение к необходимости выбора компетенций, которые должны быть разработаны управленческой командой, предлагается исходная модель для идентификации этих элементов с использованием методологии распределения затрат, как описано в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Авторская рамочная модель

Шаг	Описание
Контекстуализация	Анализ окружающей среды с целью изучения элементов, оказывающих влияние на развитие навыков
Сбор и анализ оперативных данных	Анализ, проведенный ответственным сектором/функцией, позволяет получить информацию о текущем состоянии
Выявление пробелов	Организация и описание пробелов в развитии навыков на основе полученной информации
Выбор действий	Использование матриц распределения затрат для выбора действий и определения их приоритетности

Цель состоит в том, чтобы пронаблюдать за инструментализацией предложенной структуры, основанной на анализе ее применения в области качества производственных операций. Существует четыре этапа, первый из которых связан с анализом окружающей среды, второй - со сбором и анализом данных управляющим сектором, третий - с определением необ-

ходимых навыков с помощью проблем, которые повторяются в течение более длительного периода времени, и, наконец, с выбором навыков с помощью функционально смешанной команды, которая занимается кадрами, менеджментом и инженерией. Существует сходство с методологией определения затрат, предложенной в [4.22], которая научно и систематически устанавливает программу снижения затрат.

Предлагаемая модель имеет функцию операционализации выбора компетенций на основе основных потерь от операции, которая, как отмечается в [4.23], является достоверной информацией, связанной с затратами, и которая полезна для проведения экономического анализа. Модель также определяет элементы затрат, которые должны быть включены в анализ передовых производственных систем, и предлагает способ их оценки.

#### ***4.2.4. Результаты тематического исследования***

Исследование было проведено на примере одного из производственных предприятий. В общей сложности на нем было произведено 11000 двигателей и 13000 коробок передач. В центре внимания данного тематического исследования находится внутреннее качество, обеспечивающее механическую обработку и сборочную линию. В целях защиты конфиденциальности данных компания будет называться Alpha. С 2007 года Alpha использует подход мирового класса к производству (WCM), и можно сказать, что применение методологии находится на высоком уровне зрелости.

Первым выполненным шагом было определение затрат, что имеет фундаментальное значение для достижения желаемых результатов. Сбор данных на уровне первопричины — измерение потерь (в физических единицах, таких как время, граммы, кубометры в час и т.д.) проводилось максимально детальным образом и на уровне первопричины потерь. Различные системы, внедренные на заводе, могут помочь в сборе данных и повышении качества. Существует система, которая содержит информацию,

необходимую для нашего исследования. Согласно [4.23], данные могут собираться вручную или автоматически, а на автоматизированном и подключенном заводе измерения выполняются проще и надежнее. Система качества концентрирует проблемы, указанные в качестве операций в Матрице обеспечения качества, в строках которой описаны режимы сбоев, а в столбцах - операции и станции. Система получает данные, которые вводятся в Систему качества, всякий раз, когда в процессе работы возникают несоответствия.

Поскольку все несоответствия сгруппированы в системе и организованы в матрицу (обеспечение качества), контроллер анализирует данные в соответствии с частотой возникновения сбоев в том или ином режиме, вычисляемой суммой, а также финансовыми последствиями, которые это вызывает. В работе [4.23] утверждается, что стоимость несоответствия - это потери из-за несоответствия готовой продукции стандартам качества, установленным компанией и потребителями, которые сочетают в себе обычные издержки, связанные с внутренним и внешним отказом.

Затраты на устранение несоответствий оцениваются на разных уровнях: простой ремонт, выполняемый на том же участке, где произошел сбой, средний ремонт, выполняемый в зоне наладки на завершающем этапе сборочной линии, и сложный ремонт, выполняемый в транспортном средстве. Для лома существует аналогичная шкала, и именно качество определяет, на каком уровне классифицируется несоответствие.

С помощью матрицы обеспечения качества, которая обрабатывается с периодичностью три раза в год и называется waves, в областях поддержки могут быть запущены проекты по улучшению, направленные на устранение этого несоответствия. Оценив несколько волн, можно понять, какие проблемы повторяются и не решаются должным образом. Благодаря подходу, учитывающему более длительные периоды времени, можно выявить недостаточную компетентность для решения определенных проблемных

ситуаций, а также сотрудников, которые решают одну и ту же проблему несколько раз, не устраняя первопричину или явления.

На основе собранных данных удалось выявить проблемы, которые не решаются должным образом, и одной из достигнутых целей является понимание выявленного недостатка компетентности. Далее для следующего шага необходим анализ сценариев. Для проведения этого анализа необходимы некоторые элементы организации, такие как человеческие ресурсы, инженерия и управление персоналом. Отдел кадров выполняет функцию посредничества и направления дискуссий, которые выявляют различия между концепцией, ориентированной на затраты в некоторых секторах, и концепцией инженерии, которая указывает на технические проблемы.

#### ***4.2.5. Оценка применения методологии***

Применение методологии основано на затратах на эксплуатацию, более конкретно на внутреннем качестве, при этом структура затрат, описанная в [4.23], является началом предлагаемого подхода. Работа сосредоточена на затратах на каждый отказ или несоответствие, которые внутренне определяются следующим образом: простой ремонт, выполняемый на том же участке, где произошел сбой, средний ремонт, выполняемый в зоне наладки на конечной стадии сборочной линии, сложный ремонт, выполняемый в транспортном средстве; для брака существует аналогичная шкала. Согласно [4.23], все затраты, связанные с качеством, называются “Относительно плохо структурированными затратами”.

Информация о несоответствиях, выявленных в процессе производства, регистрируется вручную путем ее внесения в Систему контроля качества, включая такие сведения, как: номер детали, на которую были произведены изменения, место, где они были выявлены, и место, где они были обнаружены. Здесь также содержатся данные о типе корректировки и ее стоимости, а также о расходах на отбраковку и проверку. Можно было по-

нять, что ручной сбор данных не идеален, поскольку значительный процент NCS не поступает в систему.

После сбора данные суммируются в матрицу, называемую QA (Quality Assurance Matrix), в строках которой указывается режим сбоя, а в столбцах - станции/операции в соответствующей области. Можно увидеть наибольшее влияние по затратам, поскольку события учитываются по типу корректировки, каждая из которых содержит стоимость и количество. После сопоставления затраты отправляются в диспетчерскую службу, которая управляет всеми потерями в ходе операции с помощью матриц затрат.

С помощью данных, сгруппированных и обобщенных в виде матриц за длительные периоды, обычно превышающие два года, можно выявить потери, которые были должным образом обработаны и устранены, а также те, которые произошли повторно. Этот шаг в рамках концепции называется “эволюция потерь” и направлен на то, чтобы показать, была ли решена проблема с помощью соответствующих ресурсов и навыков. Другой анализ основан на сценарии, который показывает рыночные условия, новые технологии и тенденции, которые повлияют на ассортимент предлагаемых потребителю продуктов.

На основе анализа истории данных, динамики потерь и анализа будущих сценариев, наконец, составляется структура с анализом необходимых ресурсов и навыков, основанных на фактах и данных. Управленческая команда может оценить проблемы, влияющие на работу, и своевременно предоставить ресурсы, будь то путем обучения, поиска профессионалов на рынке или даже с помощью внешних экспертов и консультантов. Решение о том, какому пути следовать, основывается не только на опыте, ценностях и убеждениях руководителя.

На рис. 4.8 представлена схема выполненных шагов, основанная на выявлении, анализе и классификации затрат.

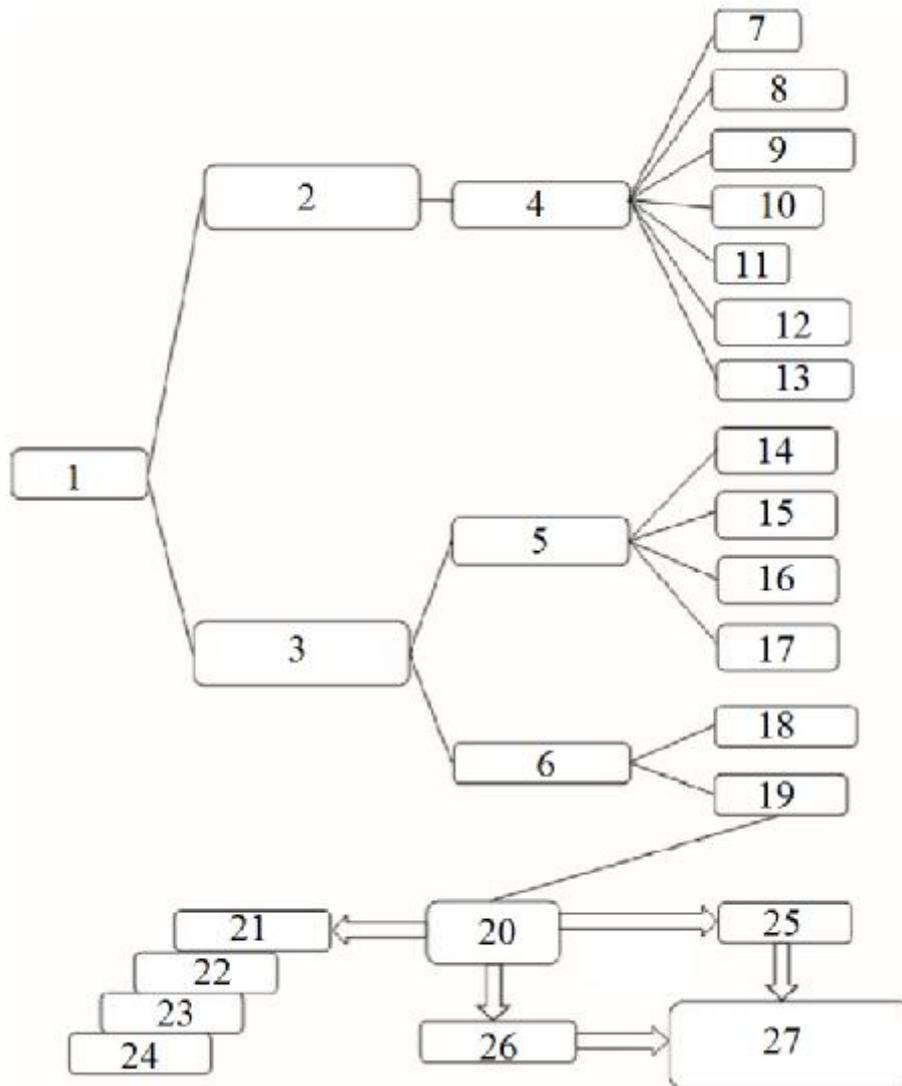


Рис. 4.8. Схема процесса разнесения затрат: 1 – общая стоимость; 2 - относительно хорошо структурированные затраты (RWSC); 3 - относительно плохо структурированные затраты (RISC); 4 - затраты на производство; 5 - стоимость гибкости; 6 - стоимость качества; 7 – труд; 8 – ресурсы; 9 – амортизация; 10 – оборудование; 11 – инструменты; 12 – рабочее пространство; 13 – программное обеспечение; 14 – инициализация; 15 – ожидание; 16 – простой; 17 – реестр; 18 – профилактика; 19 – отказ; 20 – набор данных; 21 – матрица QAM; 22 – CD-матрица А; 23 – CD-матрица В; 24 – CD-матрица С; 25 – потери; 26 – сценарий; 27 - анализ компетентности - выявление пробелов и предварительное обучение для устранения потерь

Использование описанной модели подтверждает правильность первоначального предложения и демонстрирует применение для управления ресурсами и компетенциями, которое выходит за рамки устранения потерь и расточительства. Преимущество данного тематического исследования заключается в том, что данные и матрицы уже существовали, и фреймворк использовал эти данные для выявления выявленных потерь, которые не были устранены. Чтобы проиллюстрировать полученные результаты, анализ первопричины был подчеркнут демонстрацией того, что проведенные ранее анализы и методы лечения не позволяли понять это явление, а это означает, что они лечат последствия, а не причины. Это типичная ситуация, когда профессионал - это специалист, который решает одну и ту же проблему несколько раз, но не устраняет первопричину.

#### ***4.2.6. К оценке подхода к управлению ресурсами и компетенциями***

В работе предложен подход к управлению ресурсами и компетенциями, учитывая, что во многих случаях это процесс, но решение о том, какие компетенции развивать, принимается на основе опыта и интуиции менеджеров. На основе подхода Cost deployment (CD) создается основа для составления карт и количественной оценки потерь и расточительства, и с помощью этих данных можно распознавать повторяющиеся проблемы, для решения которых у организации нет ни компетенции, ни ресурсов. Еще одним важным моментом в меняющиеся времена является анализ контекста и понимание, основанное не только на прошлом и настоящем, но и на оценке новых сценариев, продуктов, цифровизации и, совсем недавно, пандемии, охватившей мир.

Целью представленного исследования было построение структуры процесса определения и выбора компетенций, подлежащих развитию, с использованием метода распределения затрат в качестве критерия принятия решения. Очень актуальным вопросом является то, что организациям

необходимо иметь структурированный способ сбора данных об отходах и потерях и способ работы с ними, позволяющий увидеть, где организация не обладает компетенцией для решения своих проблем. Необходим длительный период времени, чтобы понять, какие проблемы возникают вновь и не является ли причиной этого недостаток компетентности.

Предлагаемый подход может стать дополнением для организаций, которые уже используют CD в качестве методологии борьбы с отходами и потерями, используя его для руководства и выбора того, куда направить энергию в отношении ресурсов и компетенций. Для организаций, которые не используют CD, эта работа может стать источником вдохновения и отправной точкой, показывающей, что можно использовать количественный подход, а не только качественный.

Одним из ограничений в этой работе является то, что применение фреймворка ограничено контекстом анализируемой автомобильной отрасли, но это может стать возможностью для дальнейшего анализа, проводимого в других организациях, с целью консолидации предлагаемой структуры.

### **4.3. Практическое применение методологии прогрессивного пакетирования работ (AWP) в системе PM.portal**

#### ***4.3.1. Основы методологии AWP***

Методология прогрессивного пакетирования работ (Advanced Work Packaging, AWP) является известной практикой реализации проектов строительства промышленных объектов. Данная методология зародилась и стала популярной в странах Запада, в России аналогом данной методологии является «Пакетно-узловой метод».

Благодаря внедрению методологии прогрессивного пакетирования

работ в проектную деятельность компании, повышаются прозрачность, предсказуемость и производительность ресурсов при реализации работ проектов за счет своевременного выявления, структуризации и обмена информацией о рабочих процессах проекта. Основной принцип методологии заключается в разбиении проектов на логически понятные и управляемые пакеты работ, организации работы по методу «набегающей волны», отстройке процесса работы с ограничениями (препятствиями в реализации работ на площадке).

Методология прогрессивного пакетирования работ представляет собой перечень рекомендаций по формированию взаимосвязанных пакетов и принципов по внутрипроектному взаимодействию участников. В методологии существует общепринятая схема связей выделяемых типовых пакетов работ (рис. 4.9).

Основными критериями разделения работ и их пакетирования являются, прежде всего, географическое местоположение, технологический объект/участок, дисциплина и затем подсистема. Общепринятый перечень пакетов:

- CWA - географически/объектно/технологически выделенные зоны на генплане, которые определяются как логические области для проведения работ.
- CWP - строительные пакеты, включают в себя информацию о проектировании, материалах, оборудовании, безопасности, качестве и разнообразную информацию, связанную со строительством.
- EWP - инжиниринговые пакеты, включают в себя результаты проектирования.
- RWP - закупочные пакеты, включают в себя информацию по материальному обеспечению.
- IWP - бригадные (монтажные) пакеты, включают в себя информацию для реализации монтажных работ. Рекомендуемая длительность одно-

го пакета до двух недель.

- SWP - системные (подсистемные) пакеты, используются для планирования ПНР. Проведенное исследование ассоциации

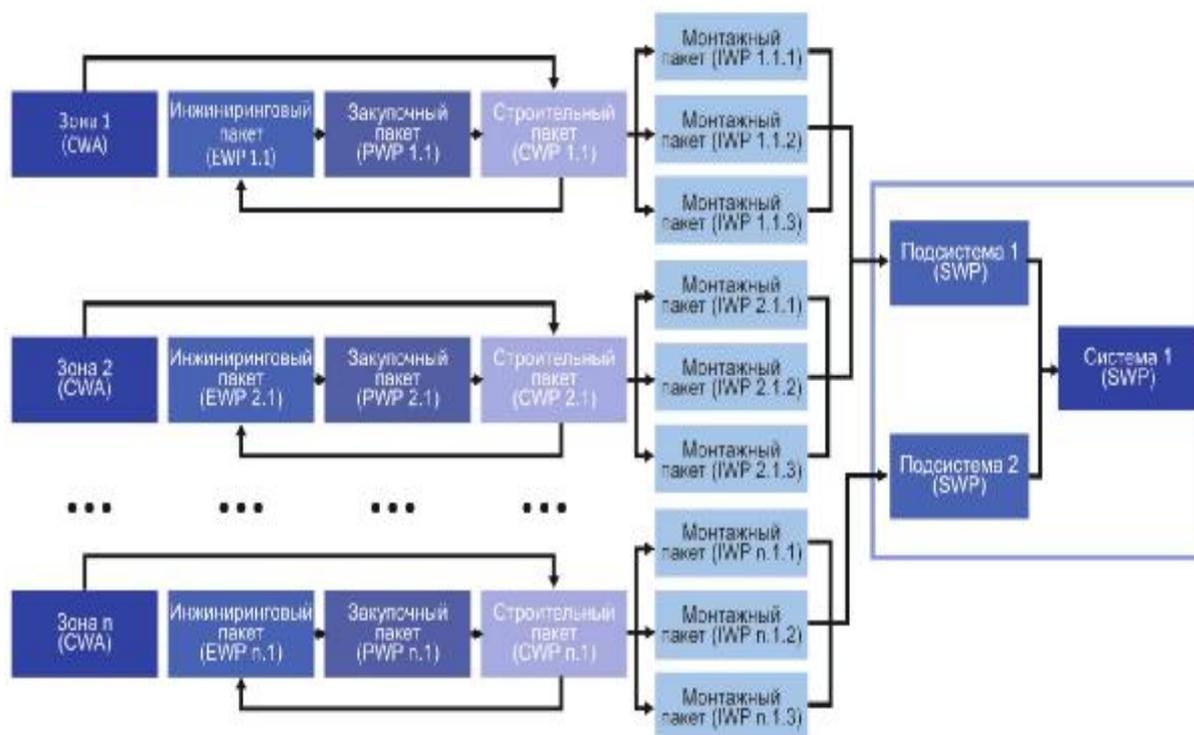


Рис. 4.9. Общепринятая схема связей выделяемых типовых пакетов работ

СИ (Construction Industry Institute) среди компаний, внедривших и успешно реализующих методологию прогрессивного пакетирования работ в своей проектной деятельности, показало, что практическое применение методологии может отличаться и изменяться в зависимости от специфики деятельности проектов и компании [4.24, 4.25]:

1. Выделение иерархической структуры зон: в отличие от общепринятого подхода выделения пакетов, на практике была выявлена необходимость выделения нескольких уровней и подуровней при формировании зон (CWA пакеты).

2. Выделение основных и дополнительных дисциплин: для более детального структурирования информации по пакетам практики выделили

основную дисциплину и дополнительную дисциплину.

3. Изменение правил выделения пакетов: некоторые практики отметили, что ценность выделения строительных пакетов (CWP пакеты) отсутствует, когда идет фокусировка на этапе ПИР.

4. Учет фазы проекта: при формировании структуры пакетов учитываются фазы или этапы проекта, которые определяют детализацию пакетов в привязке к степени проработанности проекта. Данный подход соответствует практикам СП и ААСЕi. Важно отметить, что каждый проект уникален и в каждом проекте внедрения методологии прогрессивного пакетирования работ требуется индивидуальный подход для учета особенностей: от степени детализации зон и пакетов работ, формирования уникальной кодировки пакетов работ до принятия решения о внедрении вспомогательных пакетов работ, которые не предусмотрены общепринятой методологией.

#### ***4.3.2. Методология AWP в реальных проектах***

Практический опыт проектной организации ПМСОФТ показывает, что невозможно внедрить методологию AWP в организации без адаптации стандартных подходов и решений, предлагаемых методологией, к специфике и особенностям организации и, в отдельных случаях, даже конкретных проектов.

Например, в одном из проектов потребовались изменение и отход от рекомендуемых требований по выделению зон и пакетов для обеспечения достаточной степени управляемости в условиях большого количества изменений:

- Расширение иерархической структуры зон CWA, их выделение и декомпозиция с учетом большой трудоемкости работ в рамках ограниченного пространства и выделением основных технологических комплексов.

- Учет изменений и управление ими при использовании методологии,

когда, к при- меру, изменения в закупочных пакетах PWP технологически более поздних работ вызывают необходимость изменений в уже выполненных или выполняемых в данный момент строительных пакетах CWP.

- Отход от выделения строительных пакетов CWP исключительно по дисциплинам и их укрупнение до законченных конструктивных элементов, включающих работы всего технологического процесса строительства, для приоритизации критического пути строительства (РОС).

Статистика многолетнего применения методологии AWP в проектах промышленного строительства четко показывает ее положительный эффект на сокращение сроков и стоимости реализации за счет уменьшения количества изменений в содержании и повышения эффективности труда. Однако для получения ощутимых результатов от AWP необходимо качественно трансформировать устоявшийся процесс управления проектом с учетом новых задач, возникающих вследствие применения инструментов AWP. При этом надо понимать, что эти задачи генерируют большие потоки информации и предъявляют высокие требования по скорости и качеству их обработки, и без эффективного информационного инструмента, способного полноценно поддержать данную методологию и объединить всех участников проекта в едином информационном пространстве, можно вместо положительного эффекта получить прямо обратный ему.

Подобные задачи поддерживаются системой PM.portal, позволяя:

- формировать иерархическую структуру CWA и реестры пакетов CPW, EPW, PWP, IWP, SWP для полного описания содержания проекта и возможности планирования фронтов работ;
- определять зависимости между пакетами как внутри одной зоны, так и между разными зонами для формирования пути строительства;
- управлять входными и выходными ограничениями пакетов для своевременного мониторинга отклонений и нивелирования влияний изменений на ход проекта;

- собирать актуальную информацию по фактическому выполнению работ по пакетам с последующей их агрегацией на верхних уровнях для точной оценки текущего прогресса и прогнозирования будущего выполнения;
- интегрироваться с центром управления проектными документами (DCC) и календарно-сетевым графиком для объединения потоков информации разных функциональных областей в едином центре управления;
- управлять собственными задачами пользователя в рамках методологии AWP в соответствии с настроенной ролевой моделью в его личном кабинете, обеспечивая эффективный ежедневный рабочий процесс.

### ***4.3. Обеспечение и реализация методологии AWP в PM.portal***

#### **1. Разделение проекта на зоны CWA и выделение пути строительства**

Работа по методологии AWP в PM.portal начинается с разделения всего содержания проекта на зоны CWA с определением их декомпозиции, технологической взаимосвязкой и определением пути строительства. В дальнейшем при реализации проекта и выполнении пакетов работ система автоматически агрегирует информацию по прогрессу на уровне каждой зоны по отдельности и на уровне проекта в целом, позволяя оценить прогресс каждого узла, здания, технологического или пускового комплекса или всего объекта.

#### **2. Формирование пакетов CWP, EWP, PWP**

Затем внутри каждой зоны CWA формируется состав пакетов: строительных (CWP), инжиниринговых (EWP) и закупочных (PWP). Определяется объем работ, предполагаемых конкретным пакетом, его трудозатратные показатели, связи между пакетами разных типов (инжиниринговые и закупочные пакеты, которые должны быть выполнены для возможности начать работы по строительному пакету), а также между пакетами

одного типа (в ситуациях, когда один строительный пакет является ограничением для другого). Постепенно, методом «набегающей волны» определяются сроки выполнения пакетов, а при интеграции с календарно-сетевым графиком сроки могут забираться из последнего, определяются списки входных и выходных ограничений, которые влияют на возможность начать или закончить выполнение работ пакета, с указанием сроков их снятия, а также ответственных лиц с учетом ролевой модели проекта.

### **3. Оперативное управление посредством IWP**

При оперативном управлении (на горизонте 1–3 месяцев) строительные пакеты детализируются на бригадные, в которых детально описываются физобъемы, трудозатраты и сроки выполнения работ с уточненным списком ограничений, а также приложениями, содержащими всю необходимую сопутствующую информацию (листы рабочей документации, допуск на работы, заявки на оборудование и т.п.). Бригадные пакеты также связываются зависимостями между собой и с системными пакетами, отображая технологический процесс реализации проекта и делая переход к испытаниям и вводу объекта в эксплуатацию.

### **4. Мониторинг и контроль выполнения при актуализации бригадных пакетов**

Собирается информация по фактически выполненным физобъемам, затратам времени рабочих и механочасам, фактическим срокам, что позволяет оценить прогресс выполнения на уровне как отдельного бригадного пакета, так и на уровнях строительного пакета, зоны и проекта в целом, провести план-фактный анализ и прогноз будущего выполнения.

В итоге работа с модулем AWP помогает детально расписать содержание проекта с возможностью параллельного планирования и выполнения работ, в режиме реального времени отслеживать существующие ограничения для своевременного обнаружения возможных отклонений плана и эффективного оперативного управления на стройплощадке, а также эф-

фактивного сбора фактических данных и достоверной оценки прогресса. Модуль может интегрироваться с другими модулями PM.portal в части календарно-сетевого планирования, инжиниринга и документооборота, актуализации и аналитической отчетности.



Рис. 4.10. Детализация строительных пакетов

#### **4.3.4. AWP как набор принципов и практик, обеспечивающих основу управления организационной системой**

Методология AWP - это не просто стандартизированный процесс, в котором необходимо методично следовать ряду шаблонных последовательных шагов, которые гарантированно приведут к качественному продукту в срок и в рамках бюджета. AWP - это набор принципов и практик, обеспечивающих основу, к которой ваша организация добавит свой уникальный опыт использования различных инженерных практик и собственных подходов к реализации проектов. Именно тогда методология AWP действительно сможет помочь в проектах, улучшая их управляемость и минимизируя их издержки.

Важным моментом здесь являются запуск методологии в начале проекта и обеспечение для его команды единой среды, которая поддержит ме-

тодологию с информационной стороны. Таким образом, важно подобрать команду и информационную платформу для поддержания ее работы в управлении проектом согласно методологии AWP.

#### **Источники к главе 4**

4.1. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. - М.: Наука, 1981.

4.2. Бурков В.Н., Данев Б., Еналеев А.К. и др. Большие системы: моделирование организационных механизмов. М.: Наука, 1989. - 245 с.

4.3. Белоусов В.Е., Кончаков С.А. Алгоритм для оперативного определения состояний объектов в многоуровневых технических системах// Экономика и менеджмент систем управления. № 3.2 (17). 2015. - С. 227-232.

4.4. Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий/ В.Е. Белоусов, С.А. Баркалов, К.А. Нижегородов// Матер. XVI-й Всеросс. шк.-конф. молодых ученых «Управление большими системами». -Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2019. - Т.1. - С.98-101.

4.5. Кондратьев В.Д., Бурков В.Н., Щепкин А.В. Механизмы управления экологоэкономическими системами. - М: Издательство физико-математической литературы. 2008. - 244 с

4.6. Brogårdh T. Present and future robot control development — An industrial perspective// Annual Reviews in Control 31(1), 69–79 (2007).

4.7. Selznick P. Leadership in Administration: A Sociological Interpretation. Harper & Row, NewYork (1957).

4.8. Barney J. Firm resources and sustained competitive advantage// Journal of management 17(1),99–120 (1991).

4.9. Lewis M., Slack N. Operations strategy. - Pearson Education (2014).

4.10. Mills J., Platts K., Bourne M.: Competence and resource architectures// International Journal of Operations & Production Management 23 (1), 977–994 (2003).

4.11. Mills J., Platts K., Bourne M. Applying resource-based theory. International// Journal of Operations & Production Management 23 (2), 148–166

(2003).

4.12. Newman I., Benz C.R., Ridenour C.S. Qualitative-quantitative research methodology: Exploring the interactive continuum. - SIU Press, Illinois (1998).

4.13. Giovando G., Crovini C., Venturini S. Evolutions in manufacturing cost deployment// Global Business and Economics Review 22(1–2), 41–52 (2020).

4.14. Calza F., Parmentola A., Tutore I. Types of green innovations: Ways of implementation in anon-green industry// Sustainability 9(8), 1301 (2017).

4.15. Pisano G.P. You Need an Innovation Strategy// Harvard Business Review 93, 44–54 (2015).

4.16. Pernstål J., Gorschek T., Feldt R., Florén D.: Requirements communication and balancing in large-scale software-intensive product development// Information and Software Technology 67, 44–64 (2015).

4.17. Surette E. Principles of ISO Management System Integration/Transition (ISO9001:2000/ISO14001: 1996) (No. 2005–01–0536). - SAE Technical Paper (2005).

4.18. Jin K., Palaniappan A. Resource and Operations Analysis for Agile Manufacturing System Development// IISE Annual Conference Proceedings. – Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE) (2004).

4.19. Magalhaes R. A knowing-in-practice framework for the corporate governance of information systems/technology// International Journal of Business Information Systems 3(1), 40–62 (2008).

4.20. Mills J., Platts K., Bourne M., Richards H. Strategy and Performance: Competing through Competences. - Cambridge University Press, Cambridge (2002).

4.21. Zangiski M.A.S.G., Pinheiro de Lima E., Gouvea da Costa S.E. Organizational competence building and development: Contributions to operations

management// International Journal of Production Economics 144(1), 76–89 (2013).

4.22. Yamashina H., Kubo T. Manufacturing cost deployment// International Journal of Production Research 40(16), 4077–4091 (2002).

4.23. Son Y.K. A cost estimation model for advanced manufacturing systems// The International Journal of Production Research 29(3), 441–452 (1991).

4.24. Пужанова Е.О., Петров В.Н. Российская цифровая платформа управления ЕРС-проектами. Практика ПМСОФТ// Нефть. Газ. Новации. 2023. № 9 (274). С. 28-34.

4.25. Берестюк М.А., Пужанова Е.О., Садовников С.В., Юрченко А.В., Макарова Д.В. Практическое применение методологии прогрессивного пакетирования работ (AWP) в системе PM.PORTAL// Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 8 (109). С. 78-79.

## **Заключение**

Целью работы являлась разработка специальных средств управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ проблем управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

2. Разработана смешанная модель взаимосвязанных мультиагентных организационных систем, обеспечивающая устранение неопределенности моделирования совместно с отделением сбоев и помех (на уровне агентов) от кибератак (на уровне управления).

3. Проведена формализация свойства осознанности агентов мультиагентной организационной системы, обеспечивающая получение оценки полноты осведомленности.

4. Предложен метод определения уровня зрелости организационной системы в управлении проектами, обеспечивающий минимизацию субъективности при классификации организационной системы по категориям зрелости и формирование обоснованной стратегии развития и повышения уровня зрелости.

5. Разработана методология прогрессивного пакетирования работ в организационной системе, обеспечивающая формирование перечня рекомендаций по формированию взаимосвязанных пакетов и принципов внутрипроектного взаимодействия участников.

6. Разработана архитектура программной системы PM.portal, обеспе-

чивающая мониторинг отклонений, формирование иерархической структуры проектов и управление пользовательскими задачами.

7. Элементы программного обеспечения зарегистрированы в ФИПС.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Результаты исследования рекомендуются к применению в задачах управления процессами оценки уровня зрелости мультиагентных организационных систем на основе двухуровневой оптимальной стабилизации.

2. Дальнейшая разработка темы будет направлена на практическую реализацию результатов, интеграцию в наиболее распространенные организационные системы. Развитие результатов будет направлено на улучшение модифицируемости и реконфигурируемости инструментов интеграции.

## Список использованных источников

1. Балясов А.В., Пужанова Е.О. Оценка персональных компетенций руководителя проекта// Теория активных систем. Матер. междунар. НПК. - М., 2014. С. 92-97.
2. Баркалов С.А., Белоусов А.В., Пужанова Е.О. Алгоритмы управления рисками в ИТ-проектах// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2025. Т. 25. № 3. С. 77-86.
3. Белоусов В.Е., Кончаков С.А. Алгоритм для оперативного определения состояний объектов в многоуровневых технических системах// Экономика и менеджмент систем управления. № 3.2 (17). 2015. - С. 227-232.
4. Берестюк М.А., Пужанова Е.О., Садовников С.В., Юрченко А.В., Макарова Д.В. Практическое применение методологии прогрессивного пакетирования работ (AWP) в системе PM.PORTAL// Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 8 (109). С. 78-79.
5. Беспалов П.В., Жехангер А.К.Ж., Пужанова Е.О., Моисеева Ю.В. Программа построения рациональной структуры корпоративной информационной системы. Заявка 2025696604/69 от 12.12.2025. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025697368 от 24.12.2025. - М.: Роспатент, 2025.
6. Бурков В.Н., Борковская В.Г., Пужанова Е.О., Уандыков Б.К. Задачи оперативного управления программой с учётом рисков // Тр. 4-й Всеросс. НПК (с междунар. участием) «Моделирование и наукоёмкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах». - Новокузнецк, 2016, с. 14–17.
7. Бурков В.Н., Данев Б., Еналеев А.К. и др. Большие системы: моделирование организационных механизмов. М.: Наука, 1989. - 245 с.
8. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования ор-

ганизационных систем. - М.: Наука, 1981.

9. Бурков В.Н., Пужанова Е.О., Пузырев С.А., Уандыков Б.К. Задачи оперативного управления программами с учетом риска// Системы управления и информационные технологии. 2016. № 4-1 (66). С. 128-133.

10. Бурков В.Н., Пужанова Е.О., Шихалиев М.С., Шихалиев Р.С. Задача равномерного распределения ресурсов// Системы управления и информационные технологии, 2016, т. 63, № 1, с. 8–13.

11. Буркова И.В., Пужанова Е.О., Марин О.Л. Задача о ранце и её модификации// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, серия «Управление строительством», № 1(6), 2014, с. 103–112.

12. Кондратьев В.Д., Бурков В.Н., Щепкин А.В. Механизмы управления экологоэкономическими системами. - М: Издательство физико-математической литературы. 2008. - 244 с

13. Пужанова Е. Чего не хватает российским подрядчикам для предоставления полноценного сервиса ЕРС/ЕРСМ в РФ// Комплексный инжиниринг в нефтегазодобыче: опыт, инновации, развитие - 2024. Матер. Шестой междунар. НПК. - Самара, 2024. С. 145-192.

14. Пужанова Е.О. Задачи повышения уровня зрелости организации// Теория активных систем. Матер. междунар. НПК. - М., 2014. С. 179-182.

15. Пужанова Е.О. Имитационное исследование осуществимости и эффективности стратегии управления специальными многоагентными системами// Экономика и менеджмент систем управления, №3(57), 2025. – С. 77-84.

16. Пужанова Е.О. Механизмы конвергенции повышения уровня зрелости организации в области управления проектами// Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Тр. X Всеросс. НПК (с международным участием). - Новокузнецк, 2015. С. 33-36.

17. Пужанова Е.О. Разработка алгоритма совершенствования стратегии повышения уровня зрелости организационной системы при управлении проектами// Проектное управление в строительстве. 2025. № 1 (32). С. 138-146.
18. Пужанова Е.О. Стабилизация многоагентных систем с частично неизвестной взаимосвязанной динамикой// Системы управления и информационные технологии, №3(101), 2025. С. 20-31.
19. Пужанова Е.О. Формирование календарного плана программы повышения уровня зрелости организации в области управления проектами// Экономика и менеджмент систем управления. 2016. № 4 (22). С. 32-39.
20. Пужанова Е.О., Баркалов С.А. Развитие компетенций в организационных системах с использованием матрицы принятия решений// Системы управления и информационные технологии, №4(102), 2025. С. 47-53
21. Пужанова Е.О., Петров В.Н. Российская цифровая платформа управления ЕРС-проектами. Практика ПМСОФТ// Нефть. Газ. Новации. 2023. № 9 (274). С. 28-34.
22. Пужанова Е.О., Соловьева Е.В. Разработка стратегии развития организационных способностей управления проектами// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, серия «Управление строительством» № 1(6), 2014. С. 170-178.
23. Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий/ В.Е. Белоусов, С.А. Баркалов, К.А. Нижегородов// Матер. XVI-й Всеросс. шк.-конф. молодых ученых «Управление большими системами». -Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2019. - Т.1. - С.98-101.
24. Цветков А.В., Шапиро В.Д., Ольдерогге Н.Г., Садовников С.В., Грибко В.В., Пужанова Е.О. Управление конкурентоспособностью в инвестиционно-строительном бизнесе. - М.: Омега-Л, 2013. – 486 с.
25. Abideen, A.Z., et al.: Mitigation strategies to fight the COVID-19 pandemic—present, future and beyond. J. Health Res. 34(6), 1–17 (2020)

26. Ai, X., Yu, J., Jia, Z., Shen, Y., Ma, P., & Yang, D. (2017). Adaptive robust consensus tracking for non-linear second-order multi-agent systems with heterogeneous uncertainties. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27, 5082–5096.
27. Ajmad, A., et al.: Event-driven process chain (EPC) for modeling and verification of business requirements – a systematic literature review. *IEEE Access* 6, 9027–9048 (2018)
28. Almeida, J., Silvestre, C., & Pascoal, A. (2017). Synchronization of multiagent systems using event-triggered and self-triggered broadcast. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(9), 4741–4746.
29. Antsaklis, P. (2014). Goals and challenges in cyber-physical systems research: Editorial of the editor in chief. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(12), 3117–3119.
30. ARIS Community. <https://www.ariscommunity.com/event-driven-process-chain>. Accessed 15 Nov 2020
31. Atamian, H.S., Creux, N.M., Brown, E.A., Garner, A.G., Blackman, B.K., Harmer, S.L.: Circadian regulation of sunflower heliotropism, oral orientation, and pollinator visits. *Science* **353**(6299), 587–590 (2016)
32. Baars, B.J.: *A Cognitive Theory of Consciousness*. CUP (1998)
33. Barney J. Firm resources and sustained competitive advantage// *Journal of management* 17(1),99–120 (1991).
34. Barricelli, N.A.: Work from the 2nd half of the 50s at Princeton IAS summarised in Chapter 7 of *G. Darwin Among the Machines*. Penguin, Dyson (1997)
35. Bitkowska, A.: *Zarządzanie procesowe we współczesnych organizacjach*. Difin, Warsaw (2013)
36. Blum, M., Blum, L.: A theoretical computer science perspective on consciousness, 2020. [arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2011/2011.09850.pdf](https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2011/2011.09850.pdf)
37. Brogårdh T. Present and future robot control development — An in-

dustrial perspective// *Annual Reviews in Control* 31(1), 69–79 (2007).

38. Brogers, D., & Heemels, W. (2014). Event-separation properties of event-triggered control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(10), 2644–2656.

39. Brogliato, B., & Neto, A. (1995). Practical stabilization of a class of nonlinear systems with partially known uncertainties. *Automatica*, 31(1), 145–150.

40. Business Process as a Service: the features of a good app. Heflo blog. <https://www.heflo.com/blog/bpm/business-process-as-a-service/>. Accessed 10 Nov 2020

41. Calza F., Parmentola A., Tutore I. Types of green innovations: Ways of implementation in anon-green industry// *Sustainability* 9(8), 1301 (2017).

42. Cardenas, A., Amin, S., & Sastry, S. (2008). Research challenges for the security of control system. In 3rd workshop on hot topics in security. USA.

43. Chen, Z., Han, Q.-L., Yan, Y., & Wu, Z.-G. (2020). How often should one update control and estimation: Review of networked triggering techniques. *Science China Information Sciences*, 63, 1–18.

44. Cheng, Y., & Ugrinovskii, V. (2017). Event-triggered leader-follower tracking control for interconnected systems with undirected communication graphs. In American cont. conf. USA.

45. Chomiak-Orsa, I., Kołtonowska, A.: Modelowanie procesów biznesowych z wykorzystaniem sieci Petriego i BPMN. Próba oceny metod. *Informatyka Ekonomiczna* 2(48), 9–18 (2018)

46. Cortes, J., Dullerud, G., Jerome, S., Ny, L., Mitra, S., & Pappas, G. (2016). Differential privacy in control and network systems. In IEEE conf. on decision and cont. USA.

47. Cucker, F., Smale, S.: Emergent behaviour in flocks. *IEEE Trans. Autom. Control* 52(5), 852–862 (2007)

48. Dahleh, M., & Rinehart, M. (2011). Decision and communication

networks: Overview and challenges. In T. Samad, & A. Annaswamyn (Eds.), *The impact of cont. technology, part 3: Cross-cutting research direction*. IEEE CSS.

49. Danziger, M., Bashan, A., Berezin, Y., Shekhtman, L., & Havlin, S. (2014). An introduction to interdependent networks. In *Int. conf. on nonlinear dynamics of electronic systems* (pp. 189–202). Bulgaria.

50. Dashkovskiy, S., Buffer, B., & Wirth, F. (2010). Small gain theorems for large scale systems and construction of ISS Lyapunov functions. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 48(6), 4089–4118.

51. De Persis, C., Sailer, R., & Wirth, F. (2013). Parsimonious event-triggered distributed control: A zero free approach. *Automatica*, 49, 2116–2124.

52. Dehaene, S.: *Consciousness and the Brain*. Penguin (2014)

53. Dennis, A., Wixom, B.H., Tegarden, D.: *System Analysis & Design with UML Version 2.0. An Object-Oriented Approach*, 4th edn., p. 253. Wiley, Hoboken (2012)

54. Drejewicz, Sz.: *Zrozumieć BPMN. Modelowanie procesów biznesowych*, Helion, Gliwice (2012)

55. Egerstedt, M. (2015). From algorithms to architectures in cyber-physical networks. *Cyber-Physical Systems*, 1(2–4), 67–75.

56. Fagin, R., Halpern, J.Y.: Belief, awareness and limited reasoning. *Artif. Intell.* 34, 39–76 (1988)

57. Forni, F., Galeani, S., Nesic, D., & Zaccarian, L. (2014). Event-triggered transmission for linear control over communication channels. *Automatica*, 50, 490–498.

58. Garcia, E., Cao, Y., & Casbeer, D. (2014). Decentralized event-triggered consensus with general linear dynamics. *Automatica*, 50, 2633–2640.

59. Gawin, B., Marcinkowski, B.: *Symulacja procesów biznesowych. Standardy BPMS i BPMN w praktyce*, Helion, Gliwice (2013)

60. Gawin, B.: *Modelowanie procesów biznesowych*. In: Wrycza, S.,

Mas'łankowski, J. (eds.) Informatyka Ekonomiczna. Teoria i zastosowania. Polish Scientific Publishers, Warsaw (2019)

61. Ge, X., Han, Q.-L., Zhang, X.-M., Ding, L., & Yang, F. (2020). Distributed event-triggered estimation over sensor networks: A survey. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 50(3), 1306–1320.

62. Ginsburg, S., Jablonka, E.: *The Evolution of the Sensitive Soul: Learning and the Origins of Consciousness*. MIT Press, Cambridge (2019)

63. Giovando G., Crovini C., Venturini S. Evolutions in manufacturing cost deployment// *Global Business and Economics Review* 22(1–2), 41–52 (2020).

64. Goebel, R., Sanfelice, R., & Teel, A. (2012). *Hybrid dynamical systems: Modeling, stability, and robustness*. Princeton.

65. Graziano, M.S.A.: Speculations on the evolution of awareness. *J. Cogn. Neurosci.* 26(6), 1300–1304 (2014)

66. Grindrod, P., Lester, C.: Cortex-like complex systems: what occurs within?, June 2020. [www.researchgate.net/publication/341901669](http://www.researchgate.net/publication/341901669)

67. Grindrod, P.: On human consciousness: a mathematical perspective. *Netw. Neurosci.* 2(1), 23–40 (2017)

68. Guinaldo, M., Dimarogonas, M., Johansson, K., Sanchez, J., & Dormido, S. (2013). Distributed event-based control strategies for interconnected linear systems. *IET Control Theory & Applications*, 7(6), 877–886.

69. Gzik, T.: Procesy biznesowe w chmurze obliczeniowej, *Zeszyty Naukowe Politechniki Czełstochowskiej Zarządzanie* No. 31 (2018)

70. Hameroff, S.: How quantum brain biology can rescue conscious free will. *Front. Integr. Neurosci.* 6, 93 (2012)

71. Hetel, L., Fiter, C., Omran, H., Seuret, A., Fridman, E., Richard, J., & Niculescu, S. (2017). Recent developments on the stability of systems with aperiodic sampling: An overview. *Automatica*, 76, 309–335.

72. Hołzl, M., Gabor, T.: Reasoning and learning for awareness and adap-

tation. In: Wirsing, M., Hözl, M., Koch, N., Mayer, P. (eds.) *Software Engineering for Collective Autonomic Systems*. LNCS, vol. 8998, pp. 249–290. Springer, Cham (2015).

73. Hözl, M., Wirsing, M.: Towards a system model for ensembles. In: Agha, G., Danvy, O., Meseguer, J. (eds.) *Formal Modeling: Actors, Open Systems, Biological Systems*. LNCS, vol. 7000, pp. 241–261. Springer, Heidelberg (2011).

74. Hoffman, D.D., Singh, M.: Computational evolutionary perception. *Perception* 41, 1073–1091 (2012)

75. Jelonek, D., Stepieniak, C., Turek, T., Ziora, L.: Identification of mental barriers in the implementation of cloud computing in the SMEs in Poland. In: *2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Warsaw, pp. 1251–1258 (2014)

76. Jelonek, D., Wysocka, E.: Barriers to the development of cloud computing adoption and usage in SMEs in Poland. *Adv. Inf. Sci. Appl.* 1, 128–133 (2014)

77. Jin K., Palaniappan A. *Resource and Operations Analysis for Agile Manufacturing System Development// IISE Annual Conference Proceedings*. – Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE) (2004).

78. Johnson-Laird, P.N.: *The Computer and the Mind*. Harvard University Press (1988)

79. Jurek, J.: *Wdrożenia informatycznych systemów zarządzania*. Polish Scientific Publishers, Warsaw (2016)

80. Khalil, H. (2002). *Nonlinear systems*. Prentice Hall.

81. Ko, R.K.L.: A computer scientist's introductory guide to business process management (BPM). *Crossroads* 15(4), 11–18 (2009)

82. Levesque, H.J.: A logic of implicit and explicit belief. In: *Proceedings AAAI-84*, Austin, TX, pp. 198–202 (1984). Revised and expanded: *Lab. Tech. Rept. FLAIR, #32*, Palo Alto, CA, 1984

83. Lewis M., Slack N. Operations strategy. - Pearson Education (2014).
84. Lewis, H.R., Papadimitriou, C.H.: Elements of the Theory of Computation, 2nd edn. Prentice-Hall, Hoboken (1998)
85. Lin, F. (2007). Robust control design: An optimal control approach. Wiley.
86. Liu, T., Cao, M., De Persis, C., & Hendrickx, J. (2017). Distributed event-triggered control for asymptotic synchronization of dynamical networks. *Automatica*, 86, 199–204.
87. Lombana, D., & Bernardo, M. (2016). Multiplex PI control for consensus in networks of heterogeneous linear agents. *Automatica*, 67, 310–320.
88. Lunze, J. (1992). Feedback control of large-scale systems. Prentice-Hall.
89. Magalhaes R. A knowing-in-practice framework for the corporate governance of information systems/technology// *International Journal of Business Information Systems* 3(1), 40–62 (2008).
90. Mell, P., Grance, T.: The NIST definition of cloud computing, recommendations of the National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 800-145 (2011). <https://faculty.winthrop.edu/domanm/csci411/Handouts/NIST.pdf>. Accessed 30 Nov 2020
91. Mesbahi, M., & Egerstedt, M. (2010). Graph theoretic methods in multiagent networks. Princeton.
92. Mills J., Platts K., Bourne M. Applying resource-based theory. *International Journal of Operations & Production Management* 23 (2), 148–166 (2003).
93. Mills J., Platts K., Bourne M., Richards H. Strategy and Performance: Competing through Competences. - Cambridge University Press, Cambridge (2002).
94. Mills J., Platts K., Bourne M.: Competence and resource architec-

tures// International Journal of Operations & Production Management 23 (1), 977–994 (2003).

95. Morawiec, P., Sołtysik-Piorunkiewicz, A.: The new role of cloud technologies in management information systems implementation methodology. In: Arai, K., Kapoor, S., Bhatia, R. (eds.) *FTC 2020. AISC*, vol. 1290, pp. 423–441. Springer, Cham (2021). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63092-8\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63092-8_29)

96. Newman I., Benz C.R., Ridenour C.S. *Qualitative-quantitative research methodology: Exploring the interactive continuum*. - SIU Press, Illinois (1998).

97. Oh, K.-K., Moore, K., & Ahn, H.-S. (2014). Disturbance attenuation in a consensus network of identical linear systems: An  $H_2$  approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(8), 2164–2169.

98. OMG BPMN v2.0.1 Specification. <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.1/PDF>. Accessed 13 Nov 2020

99. Oxford Mathematics of Consciousness and Applications Network. [omcan.web.ox.ac.uk](http://omcan.web.ox.ac.uk)

100. Pasamonik, P.: Modelowanie procesów biznesowych zorientowane na czynności. *Zesz. Nauk. WSInf* 9(2), 102–116 (2010)

101. Pernstål J., Gorschek T., Feldt R., Florén D.: Requirements communication and balancing in large-scale software-intensive product development// *Information and Software Technology* 67, 44–64 (2015).

102. Peterson, J.L.: *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs (1981)

103. Pisano G.P. You Need an Innovation Strategy// *Harvard Business Review* 93, 44–54 (2015).

104. Ploennigs, J., Vasyuynskyy, V., & Kabitzsch, K. (2010). Comparative study of energy-efficient sampling approaches for wireless control networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(3), 416–424.

105. Puzhanova E.O., Barkalov S.A. Adaptive multi-agent system with

control of agents' actions based on a modal approach to agents' consciousness// Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2026'AS): Proceedings of the XXXI-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2026). - Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2026. – Pp. 246-259.

106. Ray, T.S.: An approach to the synthesis of life. In: Boden, M.A. (ed.) (Without Appendices) *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford Readings in Philosophy, pp. 111–145. OUP (1996)

107. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2016). Distributed decoupling of linear multiagent systems with interconnected nonlinear uncertainties. In IEEE conf. on decision and cont. USA.

108. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2019). Discrete-time linear distributed tracking protocols for nonlinearly interconnected multiagent systems. In AIAA conference on guidance, navigation, and cont. USA.

109. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2019). Event-triggered robust cooperative stabilization in nonlinearly interconnected multiagent systems. *European Journal of Control*, 48, 9–20.

110. Rezaei, V., & Stefanovic, M. (2019). Multi-layer distributed protocols for robust cooperative tracking in interconnected nonlinear multiagent systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 29, 3859–3891.

111. Rieger, C., Moore, K., & Baldwin, T. (2013). Resilient control systems: A multiagent dynamic systems perspective. In Int. conf. on electro-information technology. USA.

112. Rosinosky, G., Labba, C., Ferme, V., Youcef, S., Charoy, F., Pattasso, C.: Evaluating multi-tenant live migrations effects on performance. In: Panetto, H., Debruyne, C., Proper, H.A., Ardagna, C.A., Roman, D., Meersman, R. (eds.) *OTM 2018*. LNCS, vol. 11229, pp. 61–77. Springer, Cham (2018). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-02610-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02610-3_4)

113. Rosinosky, G., Youcef, S., Charoy, F.: A genetic algorithm for

cost-aware business processes execution in the cloud. In: Pahl, C., Vukovic, M., Yin, J., Yu, Qi. (eds.) ICSOC 2018. LNCS, vol. 11236, pp. 198–212. Springer, Cham (2018). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03596-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03596-9_13)

114. Rosinosky, G., Youcef, S., Charoy, F.: An efficient approach for multitenant elastic business processes management in cloud computing environment. In: IEEE, pp. 311–318, June 2016

115. Sanders, J.W., Turilli, M.: Dynamics of Control. UNU-IIST Report 353, March 2007

116. Schulte, S., Janiesch, Ch., Venugopal, S., Weber, I., Hoenisch, P.: Elastic business process management: state of the art and open challenges for BPM in the cloud. *Future Gen. Comput. Syst.* 46, 36–50 (2015)

117. Selznick P. *Leadership in Administration: A Sociological Interpretation*. Harper & Row, New York (1957).

118. Solms, M., Friston, K.: How and why consciousness arises: some considerations from physics and physiology. *J. Conscious. Stud.* 25, 202–238 (2018)

119. Solms, M.: *The Hidden Spring: A Journey to the Source of Consciousness*. W.W. Norton & Co. (2021)

120. Sommerville, I.: *Software Engineering*, 9th edn., pp. 135–136. Addison-Wesley, Boston (2010)

121. Son Y.K. A cost estimation model for advanced manufacturing systems// *The International Journal of Production Research* 29(3), 441–452 (1991).

122. Stanford Encyclopedia of Philosophy. The Metaphysics Research Lab, Center for the Study of Language and Information (CSLI), Stanford University, January 2014

123. Stocker, C., & Lunze, J. (2013). Distributed control of interconnected systems with event-based information requests. In IFAC workshop on distributed estimation and cont. in networked systems. Germany.

124. Sun, Z., Huang, N., Anderson, B., & Duan, Z. (2018). Comments

on distributed event-triggered control of multi-agent systems with combinational measurements. *Automatica*, 92, 264–265.

125. Surette E. Principles of ISO Management System Integration/Transition (ISO9001:2000/ISO14001: 1996) (No. 2005–01–0536). - SAE Technical Paper (2005).

126. Tcvetkov A.V., Puzhanova E.O. et al. Algorithms for achieving mutual information coordination// *International Journal on Information Technologies and Security*, vol. 18, no. 1, 2026, pp. 79-86.

127. Tononi, G.: An information integration theory of consciousness. *BMC Neurosci.* 5, 42 (2004). 22 pages

128. Tuna, E. (2016). Synchronization under matrix-weighted Laplacian. *Automatica*, 73, 76–81.

129. Valiant, L.: *Probably Approximately Correct: Nature’s Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World*. Basic Books (2013)

130. Wang, X., & Lemmon, M. (2011). Event-triggering in distributed networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(2), 586–601.

131. Wang, X., & Lemmon, M. (2013). Event-triggered broadcasting across distributed networked control systems. In *American cont. conf. USA*.

132. Willig, A. (2008). Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 4(2), 102–124.

133. Yamashina H., Kubo T. Manufacturing cost deployment// *International Journal of Production Research* 40(16), 4077–4091 (2002).

134. Zangiski M.A.S.G., Pinheiro de Lima E., Gouvea da Costa S.E. Organizational competence building and development: Contributions to operations management// *International Journal of Production Economics* 144(1), 76–89 (2013).

135. Zhao, M., Peng, C., He, W., & Song, Y. (2018). Event-triggered

communication for leader-following consensus of second-order multiagent systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 48(6), 1888–1897.