

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 658.512.2:004.415.2
doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-5

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ НА ПРЕДПРИЯТИИ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Г. Х. Ирзаев¹, А. А. Адамова², Н. К. Юрков³

¹ Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ irzajev@mail.ru, ² arinaadamova75@gmail.com, ³ yurkov_nk@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Современным радиоэлектронным предприятиям приходится поддерживать заинтересованность потребителей за счет постоянного совершенствования выпускаемых изделий, разработки новых модификаций и внесения инженерных изменений в конструкцию и технологию изготовления. Инженерные изменения требуют значительных усилий по их планированию, согласованию и внедрению на предприятии и проводятся в большинстве случаев в ручном режиме. Настоящее исследование ставит целью разработать многоагентную систему поддержки принятия решений по управлению инженерными изменениями в изделиях с использованием широких возможностей технологий искусственного интеллекта. **Материалы и методы.** На основе ранее разработанной авторами модели обслуживания инженерных изменений сформирована оригинальная ролевая модель взаимодействий агентов. Агенты, функционирующие в условиях неопределенной среды и отсутствия полной информации, используют для выводов когнитивные структуры данных и методы дедукции и индукции. **Результаты и выводы.** Предложена концепция системы, состоящей из четырех агентов и содержащей когнитивные структуры данных и методы логических выводов с обучением и адаптацией. Сформулированы локальные цели агентов в системе, раскрыты их роль и общая логика действий по поддержке принятия решений по внедрению инженерных изменений в изделиях радиоэлектроники. Разработана логическая архитектура агента-координатора, который запрашивает оптимальные время и стоимость реализации инженерных изменений и составляет график внедрения их на предприятии. Построены также архитектуры агента-прогнозиста, агента-оптимизатора и агента обратной связи. Модель имеет ограничения в виде появления внештатных ситуаций на предприятии, юридически значимых или критических для безопасности предприятия изменений, что требует перехода на ручное управление.

Ключевые слова: агент-координатор, агент обратной связи, агент-оптимизатор, агент-прогностик, инженерное изменение, искусственный интеллект, многоагентная система

Для цитирования: Ирзаев Г. Х., Адамова А. А., Юрков Н. К. Многоагентная система автоматического планирования и управления инженерными изменениями на предприятии радиоэлектроники // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 45–53. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-5

MULTI-AGENT SYSTEM FOR AUTOMATIC PLANNING AND MANAGEMENT OF ENGINEERING CHANGES AT A RADIODEVICE ENTERPRISE

G.Kh. Irzaev¹, A.A. Adamova², N.K. Yurkov³

¹ Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ irzajev@mail.ru, ² arinaadamova75@gmail.com, ³ yurkov_nk@mail.ru

Abstract. *Background.* Modern radio-electronic enterprises have to maintain consumer interest by continuously improving their products, developing new modifications and introducing engineering changes into the design and manufacturing technology. Engineering changes require significant efforts for their planning, coordination and implementation at the enterprise and are carried out in most cases manually. This study aims to develop a multi-agent decision support system for managing engineering changes in products using the wide capabilities of artificial intelligence technologies. *Materials and methods.* Based on the engineering change maintenance model previously developed by the authors, an original role model of agent interactions has been formed. Agents operating in an uncertain environment and lack of complete information use cognitive data structures and deduction and induction methods to draw conclusions. *Results and conclusions.* The concept of a system consisting of four agents and containing cognitive data structures and methods of logical inference with training and adaptation is proposed. Local goals of agents in the system are formulated, their role and general logic of actions to support decision-making on the implementation of engineering changes in electronic products are revealed. The logical architecture of the coordinator agent is developed, which requests the optimal time and cost of implementing engineering changes and makes a schedule for their implementation at the enterprise. Architectures of the forecaster agent, optimizer agent and feedback agent are also built. The model has limitations in the form of emergency situations at the enterprise, legally significant or critical changes for the safety of the enterprise, which requires switching to manual control.

Keywords: coordinator agent, feedback agent, optimizer agent, forecaster agent, engineering change, artificial intelligence, multi-agent system

For citation: Irzaev G.Kh., Adamova A.A., Yurkov N.K. Multi-agent system for automatic planning and management of engineering changes at a radioelectronics enterprise. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):45–53. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-5

Введение

Генерация инженерных изменений (Ини), проработка конструкторско-технологической документации, согласование их со специалистами и внедрение связаны с целым рядом проблем, требующих исследований и разработки инструментария управления ими. Цикл проведения инженерных изменений на радиоэлектронные изделия включает в себя ряд этапов, показанных на рис. 1.

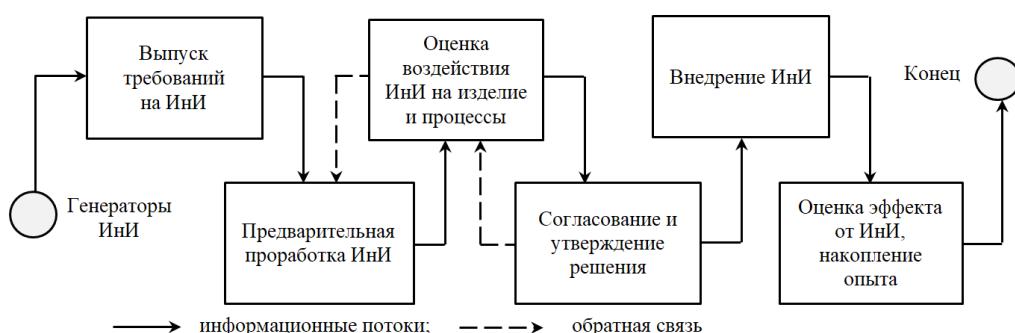


Рис. 1. Процесс генерации, проработки, согласования и внедрения инженерных изменений

Требования на Ини в изделиях могут генерировать как проектировщики изделия, так и технологии, материаловеды, специалисты подразделений, заказчики и другие из-за того, что целевые свойства продукта больше не соответствуют его фактическим свойствам. Отклонение может иметь как внутренние, так и внешние причины [1]. Внутренние причины инженерных изменений в изделии – это внутренние инновации и улучшения продукта, знания, полученные в процессе производства, сборки и управления качеством, сообщения о внутренних ошибках, организационные изменения

внутри предприятия, чрезмерно высокие затраты, ошибки проектирования из-за отсутствия знаний о продукте или условиях его использования. Внешними причинами можно считать, например, появление новых материалов и технологий, цифровизацию производственных процессов, изменения требований или тенденций рынка, запросов потребителей, улучшение аналогов у конкурентов, изменения комплектующих и компонентов, получаемых от поставщиков, изменения законов, стандартов, нормативно-технических документов, жалобы, отзывы и рекламации клиентов [2, 3]. Возникает необходимость в упорядочении связей и коммуникаций между исполнителями и службами, отвечающими за разработку, внесение ИИ в конструкторско-технологическую документацию и внедрение в производство, устранение разногласий между ними без повышения стоимости затрат.

Процесс внедрения ИИ включает в себя коммуникацию множества заинтересованных сторон и отделов на предприятии, которые свободно сотрудничают посредством действий координатора изменений. В условиях развития цифровой среды на промышленных предприятиях процессы управления ИИ, вносимыми в проектируемые и осваиваемые изделия, требуют автоматизации и интеллектуализации [4, 5]. Представление свободного сотрудничества между автономными субъектами, управление процессами внедрения ИИ становится возможным через многоагентную систему с возможностями искусственного интеллекта.

Согласно определению Рассела и Норвига [6], агент – это автономная сущность, которая воспринимает среду через датчики, на основе информации от которых он может действовать через исполнительные механизмы. Агенты способны осуществлять логические выводы в условиях получения неполной и противоречивой информации, они содержат когнитивные структуры данных и методы, реализующие дедуктивные или индуктивные выводы [7]. Кроме того, модель агента интегрирует механизмы рассуждения на основе знаний с нейросетевым (коннекционистским) подходом с обучением и адаптацией. Как справедливо отмечено в работе [8], взаимодействие агентов связано с переговорами и достижением согласия за счет интерактивного обмена информацией в форме предложений и контрпредложений.

Модель многоагентной системы управления инженерными изменениями

Разработана ролевая модель взаимодействий, происходящих в многоагентной системе поддержки принятия решений по управлению ИИ (рис. 2). Ролевой аспект охватывает возможные специализации агентов и то, как они могут быть связаны друг с другом [9].

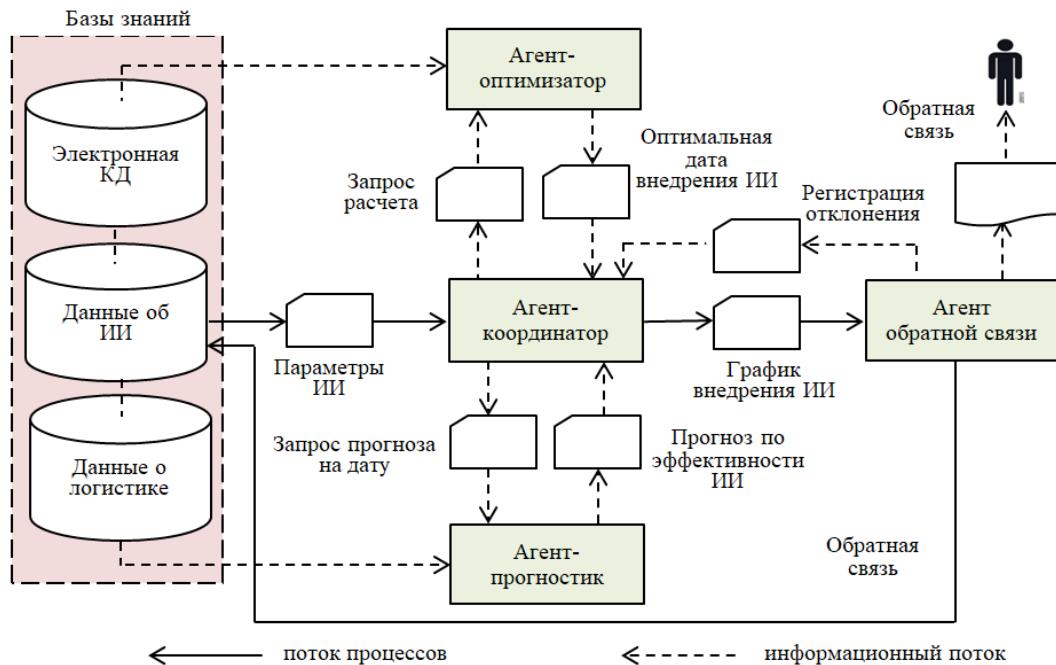


Рис. 2. Модель многоагентной системы внедрения ИИ на предприятии

Роль – своего рода абстракция поведения агента, его обязанностей, в данном случае при организации процессов внедрения ИИ в изделиях на предприятии. Она дает представление об общих функциях агентов, которые будут расширены по мере детализированной разработки многоагентной

системы. Цели агентов в системе можно сформулировать следующим образом в соответствии с задачами, описанными в работе [10]:

Ц1 – определение оптимальных для предприятия сроков вступления в силу Инициативы на уровне деталей или сборочных единиц;

Ц2 – выработка прогноза о введении Инициативы на деталь (сборочную единицу) в соответствии с принятым на предприятии регламентом и в зависимости от данных других участников согласования Инициативы;

Ц3 – предоставление графика внедрения Инициативы в соответствии с результатами достижения целей Ц1 и Ц2;

Ц4 – предоставление обратной связи.

Цель Ц1 может включать в себя также пакетирование Инициативы одной причиной возникновения для группы изделий одного класса, это снижает затраты и сложность внедрения изменений. При автоматизации процессов на предприятии выполнить Ц2 – предсказать дату внедрения изменения – можно через приложения искусственного интеллекта, используя данные из нескольких источников. Ц3 способствует автоматизации планирования Инициативы, что значительно улучшает эксплуатацию дополнительных мощностей и ресурсов, необходимых для их внедрения на предприятии. Ц4 позволяет контролировать процессы и осуществлять при необходимости ручное вмешательство.

На рис. 2 показано, как агент-координатор управляет задачами и предоставляет график внедрения Инициативы. При поступлении нового Инициативы он запрашивает расчет оптимальных значений дат вступления в силу изменений с точки зрения минимальных затрат (эффективности изменения). Агентом запрашивается также прогноз по показателю эффективности изменения. Агент сравнивает дату и прогноз по эффективности с идентифицированным набором правил. Если результат – в пределах приемлемых величин, Инициатива планируется в производственной сети, иначе – агент-координатор повторно запускает агента-оптимизатора, запрашивая поиск следующего лучшего локального оптимума.

Агент-оптимизатор обращается к первой цели для определения оптимальной даты внедрения Инициативы с точки зрения стоимости и времени. Перед расчетом оптимальных значений агент должен провести классификацию изменения и идентифицировать его тип для связывания с затратами на его внедрение. Информация предоставляется агенту-координатору. Исполнительные механизмы агента-оптимизатора могут быть разработаны как закодированные параметры генетического алгоритма в сочетании с поиском.

Агент-прогностик выполняет Ц2 и предоставляет агенту-координатору доверительный интервал точности внедрения инженерного изменения и оценку воздействия. Его поток управления достаточно простой, так как при инициализации агенту поручается прогнозировать эффективность внедрения для всех заданных дат. После расчета прогноза результат возвращается для сопоставления с набором правил агента-координатора. Прогностик – обучающийся агент, постоянно улучшающий свои прогнозы с помощью данных прошлых изменений.

Агент обратной связи в соответствии с Ц4 обеспечивает информацией человека в случае необходимости ручного управления и вносит изменения в базы знаний. Контролируя график внедрения Инициативы, он в случае выявления каких-либо отклонений информирует оператора-человека и агента-координатора. Агенту должен быть предоставлен базовый набор правил, согласно которым отклонения считаются достаточно серьезными, чтобы потребовать проверки графика внедрения изменений или даже отменить само Инициативу.

Для каждого агента необходима среда задачи, определяемая показателем производительности, исполнительным механизмом и датчиком. Эти показатели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели агентов системы внедрения Инициативы на предприятии

Показатели	Агент				
	координатор	оптимизатор	прогностик	обратной связи	
1	2	3	4	5	
Производительность	Точность планирования	Стоимость реализации и время	Качество прогноза	Ручное вмешательство	
Среда	Данные об Инициативе	Проектирование, логистика, данные об Инициативе	Прошлые и текущие данные о логистике, данные проектирования, данные об Инициативе	Расписание Инициативы	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Исполнительный механизм	Запрос расчета, запрос прогнозирования, алгоритм сравнения, планирование Ини, запрос на ручное управление	Алгоритм классификатора, алгоритм расчета	Алгоритм прогнозирования	Запросы прогнозирования, конфигурация Ини, данные процесса и синхронизации
Датчики	Конфигурация Ини, расчет, прогнозирование, информация о реализации, проверка планирования	Конфигурация Ини, запросы на расчет, данные цепочки поставок, данные о продукте, график производства	Проверка планирования запрос, обратная связь, распределение	Данные графика Ини, данные прогнозирования, данные процесса и синхронизации

Архитектура и функции агентов системы управления инженерными изменениями

Главный агент всей системы – координатор, осуществляет согласование задач с другими агентами и предоставляет график внедрения Ини, выполняя цель Ц1. Разработанный как агент, нацеленный на обучение, он имеет логическую архитектуру, показанную на блок-схеме (рис. 3). Решения принимаются не последовательно, а скорее одновременно, отталкиваясь от информации, полученной от датчиков, которые позволяют воспринимать агенту окружающую среду и действовать в зависимости от текущего состояния.

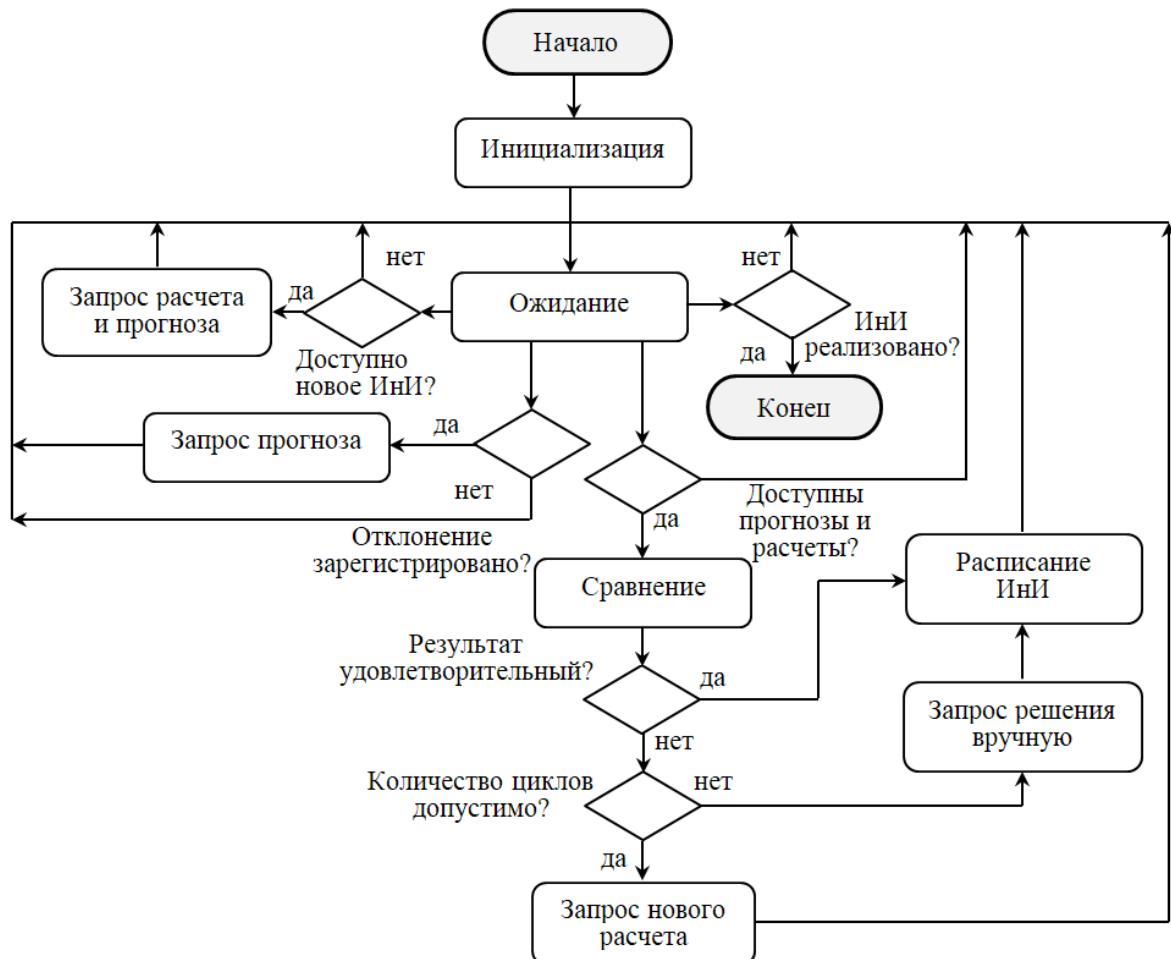


Рис. 3. Логическая архитектура агента-координатора

После инициализации агент находится в состоянии ожидания доступа к новому требованию на ИНИ. После его получения агент-координатор запрашивает расчет оптимальных значений времени реализации и стоимости ИНИ. Кроме того, запрашивается прогноз эффективности внедрения конкретного ИНИ. При наличии оптимального прогноза агент сравнивает прогнозируемый эффект и идентифицированную дату с набором правил. Если полученная сравнительная оценка находится в приемлемых пределах, то ИНИ планируется в производственной сети, иначе – агент-координатор повторно запускает агента-оптимизатора, запрашивая поиск следующего лучшего локального оптимума, перезапуская цепочку «оптимизация – прогнозирование – график внедрения».

Если от агента обратной связи не получен запрос на управление расписанием, агент-координатор остается в состоянии ожидания до получения подтверждения от ИИ, что приводит к его завершению. Однако если зафиксировано отклонение, агент-координатор запрашивает новый прогноз для переоценки ситуации и в зависимости от результата расписание подтверждается или требуется новый оптимальный расчет, фактически перезапускается последовательность «оптимизация – прогнозирование – график внедрения». Наконец, следует установить ограничение на количество циклов, которые могут быть перезапущены, и в случае, если глобальный оптимум не достигается, запрашивается ручное переопределение или решение.

Факторы, которые необходимо учитывать при разработке агента-координатора, – частота проверки, концепция хранения данных и набор правил. Если первый и второй факторы ограничены вычислительными ресурсами, то набор правил унискален в соответствии с требованиями конкретного предприятия. В качестве показателя производительности предлагается точность планирования (табл. 1), поскольку эта метрика позволяет агенту-координатору автономно улучшать и адаптировать набор правил с течением времени, повышая точность и эффективность будущих графиков внедрения ИНИ. Для улучшения работы агента предложен алгоритм обучения с подкреплением, который заключается в том, что сначала работа агентов должна контролироваться человеком, пока не будет накоплен опыт и собраны данные.

Агент-оптимизатор представляет достижение цели Ц1 и задачу поиска оптимальных сроков внедрения инженерного изменения с точки зрения минимальных затрат материальных ресурсов и времени (рис. 4). Кроме этого, оптимизатор должен идентифицировать тип изменения и привязанную к нему стоимость затрат. Требуется отдельное исследование того, какая классификация лучше: основанная на правилах или машинном обучении. После определения глобального оптимума и классификации типа изменения информация предоставляется агенту-координатору и агент-оптимизатор возвращается в состояние ожидания. Если получен дополнительный запрос на расчет, оптимизатор ищет вторую лучшую дату вступления в силу Ини. После уведомления о том, что Ини запланировано, агент прекращает работу.

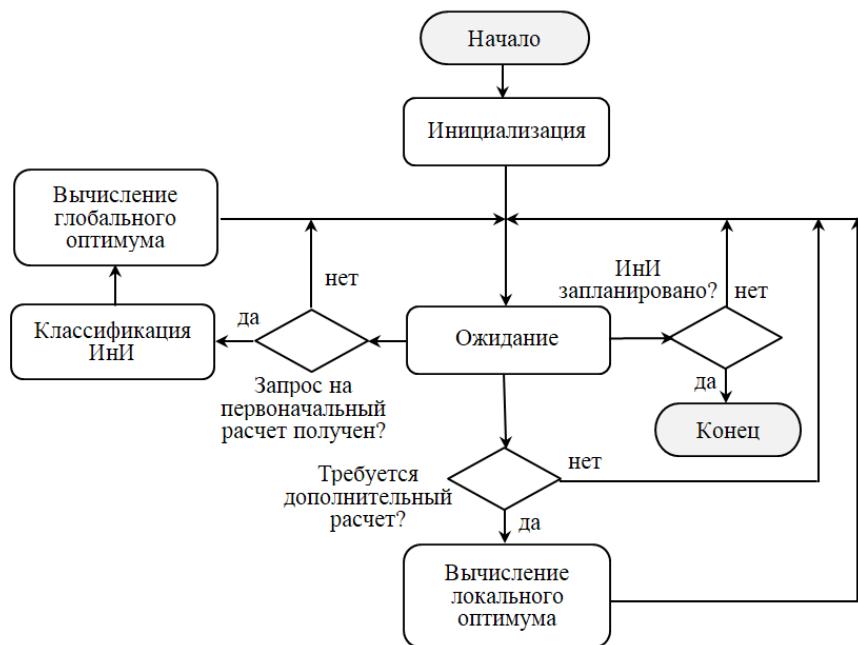


Рис. 4. Логическая архитектура агента-оптимизатора

Агент-прогностик обращается к выполнению Ц2 – прогнозированию эффекта от внедрения ИИ. Поэтому он предоставляет координатору доверительный интервал точности внедрения и оценку воздействия. Его поток управления (рис. 5) довольно прост, так как при инициализации агенту поручается прогнозировать эффективность для всех заданных дат и текущей информации об ИИ. После расчета прогноза для этих эффектов результат возвращается для сопоставления с набором правил агента-координатора. Прогностик является обучающимся агентом, постоянно улучшающим свои прогнозы с помощью данных прошлых изменений. Он имеет самый большой объем потребления данных, для алгоритма прогнозирования предложена контролируемая модель массового обслуживания.

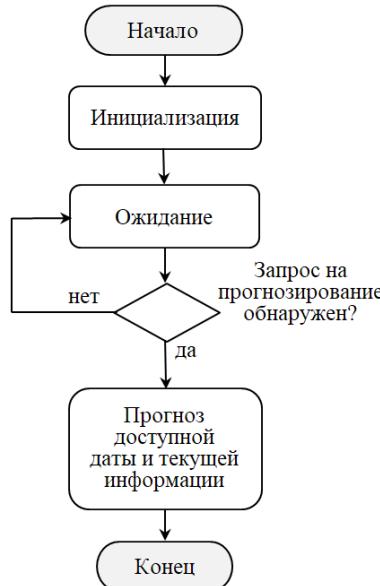


Рис. 5. Логическая архитектура агента-прогностика

Агент обратной связи имеет логическую архитектуру, показанную на рис. 6, и предоставляет предложения для выполнения Ц4. Его цель – контролировать график внедрения ИИ и в случае обнаружения отклонений информировать об этом человека-оператора либо агента-координатора.

Первоначально должен быть предоставлен базовый набор правил, по которым отклонения считаются достаточно серьезными, чтобы потребовать проверки расписания или даже отмены ИИ. В настоящее время основная сложность заключается в прогнозировании результата этапа в зависимости от прошедшего времени. Это единственный агент, который зависит от человека-машинного интерфейса, мерой его производительности является количество ручных вмешательств в процесс рассмотрения ИИ. Случай ручного управления могут быть использованы агентом для изучения и улучшения набора правил отклонения с помощью алгоритма обучения с подкреплением.

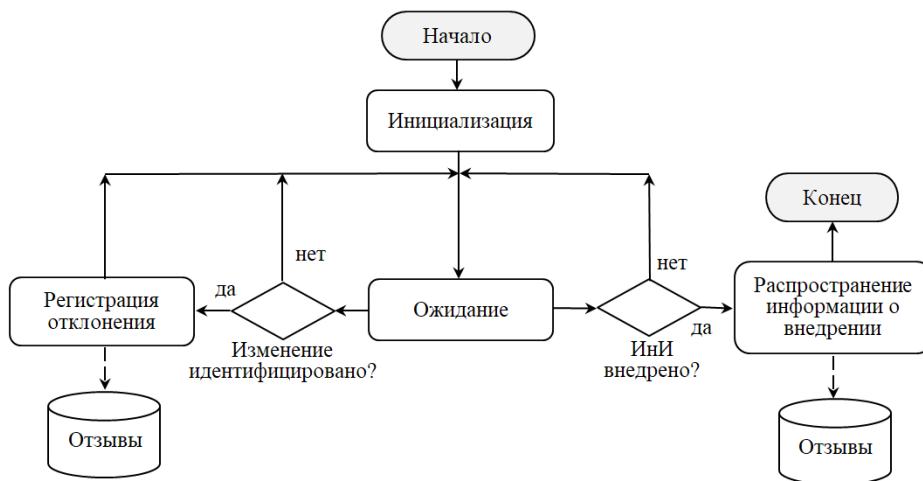


Рис. 6. Логическая архитектура агента обратной связи

Заключение

В статье представлена концепция многоагентной системы для автоматического планирования внедрения ИНиИ на предприятии. Определены четыре цели для эффективного планирования системы, для их выполнения введены четыре агента. Обсуждены логика действий и цели каждого агента. Необходимо отметить ряд ограничений, накладываемых на функционирование многоагентной системы. Они связаны с непредсказуемым возникновением на предприятии внештатных ситуаций, связанных с появлением и внедрением некоторых ИНиИ. Кроме того, при внедрении юридически значимых или критических для безопасности изменений, они должны быть проверены и одобрены только человеком. Невозможность предугадать все вероятные исходы взаимодействия автономных агентов может привести к непредсказуемому поведению системы управления ИНиИ, что связано с естественной ограниченностью моделей неоднородных агентов, а также не всегда формализуемой логикой поведения их при совместном решении задач [11]. Однако предложенная модель с учетом ограничений будет совершенствоваться, компоненты модели уточняться, в дальнейшем возможно введение в модель других агентов.

Благодаря разработанной многоагентной системе на предприятиях с многочисленными ИНиИ в ходе проектирования, освоения и производства изделий можно будет оказать поддержку внедрению инженерных изменений, используя возможности искусственного интеллекта. За счет этого сократить временные и материальные затраты на проведение и внедрение ИНиИ, улучшить организационные и коммуникационные возможности подразделений предприятия.

Список литературы

1. Ирзаев Г. Х. Анализ процессов внесения инженерных изменений в конструкцию радиоэлектронных средств на этапах проектирования и освоения серийного производства // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 72–78.
2. Wooldridge M., Jennings N. R., Kinny D. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2000. Vol. 3, № 3. P. 285–312.
3. Wildemann H. Änderungs management, Leitfaden zur Einführung eineseffizienten Managements technischer Änderungen. München : Tcwtransfer-Centrum, 2006.
4. Ehrlenspiel K. Integrierte Produkt entwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München ; Wien, 2007.
5. Ирзаев Г. Х. Управление инженерными изменениями в изделиях радиоэлектронного приборостроения с помощью технологий виртуальной и дополненной реальности // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 1. С. 130–140.
6. Russell S. J., Norvig P. Artificial intelligence: A modern approach, Always learning, Third edition, Global edition, Pearson. Boston ; Columbus ; Indianapolis, 2016.
7. Лихтенштейн В. Е., Конявский В. А., Росс Г. В., Лось В. П. Мультиагентные системы: самоорганизация и развитие. М. : Финансы и статистика, 2018. 264 с.
8. Романчева Н. И. Особенности использования мультиагентных технологий в киберсоциальных системах // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 1. С. 79–82.
9. Юрков Н. К., Бецков А. В., Самокутяев А. М. Мультиагентное управление сложными динамическими системами // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 6–12.
10. Potdar P., Jonnalagedda V. Design and development of a framework for effective engineering change management in manufacturing industries // International Journal of Product Lifecycle Management. 2018. Vol. 11, № 4. P. 368.
11. Маслобоев А. В. Обобщенная методология построения мультиагентных систем управления жизнеспособностью критических инфраструктур // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 134–146.

References

1. Irzayev G.Kh. Analysis of the processes of making engineering changes to the design of electronic means at the stages of design and development of mass production. *Voprosy radioelektroniki = Radio electronics issues*. 2016;(11):72–78. (In Russ.)
2. Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2000;3(3):285–312.
3. Wildemann H. Änderungs management, Leitfaden zur Einführung eineseffizienten Managements technischer Änderungen. München: Tcwtransfer-Centrum, 2006.
4. Ehrlenspiel K. *Integrierte Produkt entwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München; Wien, 2007.
5. Irzayev G.Kh. Management of engineering changes in electronic instrumentation products using virtual and augmented reality technologies. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2024;(1):130–140. (In Russ.)

6. Russell S.J., Norvig P. *Artificial intelligence: A modern approach, Always learning, Third edition, Global edition, Pearson*. Boston; Columbus; Indianapolis, 2016.
7. Likhtenshteyn V.E., Konyavskiy V.A., Ross G.V., Los' V.P. *Mul'tiagentnyye sistemy: samoorganizatsiya i razvitiye = Multi-agent systems: self-organization and development*. Moscow: Finansy i statistika, 2018:264. (In Russ.)
8. Romancheva N.I. Features of the use of multi-agent technologies in cybersocial systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;1:79–82. (In Russ.)
9. Yurkov N.K., Betskov A.V., Samokutyayev A.M. Multi-agent management of complex dynamic systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:6–12. (In Russ.)
10. Potdar P., Jonnalagedda V. Design and development of a framework for effective engineering change management in manufacturing industries. *International Journal of Product Lifecycle Management*. 2018;11(4):368.
11. Masloboev A.V. Generalized methodology for building multi-agent systems for managing the viability of critical infrastructures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):134–146. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Гамид Хайбулаевич Ирзаев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры программного
обеспечения вычислительной техники
и автоматизированных систем,
Дагестанский государственный
технический университет
(Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала,
пр-кт И. Шамиля, 70)
E-mail: irzajev@mail.ru

Арина Александровна Адамова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(национальный университет)
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: arinaadamova75@gmail.com

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_nk@mail.ru

Gamid Kh. Irzaev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department of software,
computer science and automated systems,
Daghestan State Technical University
(70 I. Shamil avenue, Makhachkala,
Republic of Daghestan, Russia)

Arina A. Adamova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department of design
and production technology of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 11.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 12.05.2025

Принята к публикации/Accepted 08.06.2025