

# Формальные модели и алгоритмы интеллектуального контура обработки управленческих случаев во внутрифирменном планировании промышленного предприятия

С. С. Адышкин • Е. В. Пальчевский • В. В. Антонов

*МИРЭА – Российский технологический университет  
Уфимский университет науки и технологий*

В статье рассматривается задача формализации интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия. Актуальность исследования обусловлена тем, что современные ERP-, MES-, APS- и BI-системы позволяют оперативно фиксировать отклонения плановых показателей, однако сами по себе не обеспечивают формально заданный переход от обнаруженного нарушения к выбору обоснованного управленческого реагирования. В результате между информационно-аналитическим контуром и контуром принятия решений сохраняется разрыв, снижающий воспроизводимость и объяснимость управленческих действий. Цель работы состоит в разработке формальных моделей и алгоритмов, обеспечивающих преобразование события отклонения в управленческий случай с последующей оценкой его значимости, диагностикой причины, расчетом риска, выбором допустимого варианта реагирования, маршрутизацией и протоколированием результата. Предложена модель управленческого случая, включающая событие отклонения, наблюдаемое состояние, абсолютные и нормированные отклонения KPI, класс значимости, диагностированную причину, риск-оценку, множество допустимых вариантов реагирования, выбранное воздействие, маршрут обработки, экспертный исход и протокол решения. Формализованы статусы обработки случая, допустимые переходы между ними, правила оценки отклонений, механизм выбора предпочтительного варианта и условия передачи случая на экспертную валидацию. Практическая реализуемость подхода показана на уровне исследовательского программного прототипа, включающего вычислительно-алгоритмический слой, слой хранения состояний и протоколов, а также слой экспертной валидации. Полученные результаты могут использоваться как методическая основа для разработки интеллектуальных модулей поддержки внутрифирменного планирования, обеспечивающих прослеживаемость, воспроизводимость и формализованное сопровождение управленческих решений.

*Внутрифирменное планирование; интеллектуальный контур управления; управленческий случай; событие отклонения; KPI; риск-оценка; экспертная валидация; протоколирование решений; промышленное предприятие.*

## ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуализация внутрифирменного планирования на промышленных предприятиях в последние годы смещается от автоматизации отдельных процедур план-факт-анализа к построению замкнутых контуров управления, в которых выявление отклонений, анализ причин, выбор корректирующих воздействий и фиксация результата образуют единую управленческую последовательность. Такое смещение связано с развитием корпоративных информационных систем и интегрированных платформ управления предприятием: ERP-системы обеспечивают согласование ключевых информационных потоков предприятия [But23, Fen24],

Адышкин С. С., Пальчевский Е. В., Антонов В. В. Формальные модели и алгоритмы интеллектуального контура обработки управленческих случаев во внутрифирменном планировании промышленного предприятия // СИИТ. 2026. Т. 8, № 5(29). С. 3-24. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p3. EDN: AQWSAH.

Adyshkin S. S., Palchevsky E. V., Antonov V. V. "Formal models and algorithms of an intelligent control loop for processing management cases in intrafirm planning of an industrial enterprise" // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 5(29), pp. 3-24. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p3. EDN: AQWSAH. (In Russian).

APS-подходы развивают задачи расширенного производственного и цепочечного планирования [Stu22], а аналитические и BI-инструменты формируют основу для перехода от накопления данных к поддержке управленческих решений [Ain25]. Дополнительные предпосылки создает развитие киберфизических и интеллектуальных производственных систем, характерных для промышленной цифровизации и концепции Industry 4.0 [Oks24].

Развитие корпоративных платформ ERP, MES, APS и BI, а также распространение инструментов промышленной аналитики создают технологические предпосылки для такого перехода: предприятие получает возможность оперативно фиксировать изменения состояния производственных, снабженческих, логистических и финансовых процессов, сопоставлять плановые и фактические значения KPI, а также формировать информационную основу для последующего управленческого реагирования. Вместе с тем наличие цифровой инфраструктуры само по себе не гарантирует повышения управляемости, поскольку автоматизированная регистрация отклонения еще не означает, что предприятие располагает формально заданным механизмом выбора корректирующего действия. На практике после выявления нарушения дальнейшая реакция нередко переносится в область ручных согласований, локальных экспертных интерпретаций и неунифицированных процедур принятия решений. Эта проблема особенно заметна в контурах согласованного планирования, включая S&OP/IBP, где требуется не только сопоставление планов и фактов, но и межфункциональное согласование управленческих воздействий [Kim24, Bha23]. В результате внутрифирменное планирование сохраняет разрыв между информационно-аналитическим контуром, фиксирующим проблему, и контуром управленческого воздействия, отвечающим за выбор реакции; это снижает воспроизводимость решений, затрудняет сопоставление управленческих действий в различных плановых циклах и ограничивает возможность ретроспективного объяснения причин выбора конкретной альтернативы.

С научной точки зрения обозначенная проблема проявляется как противоречие между, с одной стороны, ростом возможностей цифрового мониторинга, анализа и прогнозирования, а с другой стороны, недостаточной формализацией интеллектуального контура управления, который должен связывать данные, событие отклонения, оценку его значимости, диагностику причин, выбор допустимого класса реагирования, экспертное участие и протоколирование результата в единую управленческую петлю. В существующих подходах акцент часто делается либо на архитектурной стороне цифрового предприятия, включая интеграцию информационных систем, организацию потоков данных и построение процессных моделей [Put24], либо на отдельных алгоритмических процедурах мониторинга KPI, прогнозирования, диагностики и оптимизации. При этом методы process mining позволяют восстанавливать и анализировать фактическое прохождение процессов по событийным данным [Yur22], однако сами по себе не задают полного механизма выбора управленческого воздействия. Аналогично классические и современные подходы к системам поддержки принятия решений формируют основу для компьютерной поддержки управленческого выбора [Soo26, Kos24], но требуют адаптации к статусной, риск-ориентированной и протоколируемой логике обработки управленческих случаев. Однако без формального описания переходов между этапами управленческого цикла такие решения плохо складываются в воспроизводимую модель функционирования: результат мониторинга не всегда однозначно становится входом для диагностики, диагностическая оценка не всегда приводит к формированию множества допустимых воздействий, а выбранное управленческое действие не всегда сопровождается фиксацией исходных данных, ограничений, альтернатив и оснований принятого решения.

Ранее были получены результаты, формирующие теоретико-методологическую основу рассматриваемой проблематики. В частности, была предложена системная постановка задачи интеллектуальной архитектуры управления промышленным предприятием в контуре внутрифирменного планирования [Ады26], а также рассмотрены формальные подходы к проектированию программных аналитических комплексов как основы для реализации интеллектуаль-

ных контуров обработки данных и поддержки решений [Род23]. Указанные результаты позволяют описать архитектурную, процессную и локально-алгоритмическую стороны задачи, однако не исчерпывают вопрос о том, как должен функционировать интеллектуальный контур при обработке конкретного события отклонения. Недостаточно разработанным остается механизм интеграции этих компонентов в единую формальную и алгоритмическую модель, в которой событие отклонения получает статус управленческого случая, проходит стадии регистрации, нормализации, интерпретации, оценки риска, выбора класса реагирования, экспертной валидации при необходимости и протоколирования результата.

Целью настоящей работы является разработка формальных моделей и алгоритмов интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия, обеспечивающих алгоритмизуемый переход от события отклонения к обоснованному выбору класса управленческого реагирования с учетом риска, ограничений и экспертного участия. В рамках поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Уточнить состав сущностей и состояний интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием.
2. Сформировать модель событий, решений и статусов обработки управленческого случая.
3. Разработать алгоритмы обработки отклонений и выбора корректирующих воздействий.
4. Формализовать механизм включения эксперта в контур принятия решения.
5. Показать архитектурную реализуемость предложенного подхода в исследовательском программном прототипе.

Научная новизна исследования заключается в том, что интеллектуальный контур внутрифирменного планирования трактуется не как общая архитектурная рамка и не как отдельная процедура согласования, а как система формальных моделей и алгоритмов функционирования, обеспечивающая последовательное преобразование события отклонения в управленческое решение. В рамках данной трактовки формально задаются состав сущностей и состояний управленческого случая, статусы его обработки, переход от наблюдаемого нарушения к множеству допустимых корректирующих воздействий, а также маршрутизация решения в зависимости от уровня риска, регламентных условий и необходимости экспертной валидации. Участие эксперта рассматривается не как внешнее ручное вмешательство, а как штатный этап замкнутого управленческого цикла, включенный в общую логику обработки отклонения и подлежащий фиксации в протоколе решения.

Практическая значимость результатов определяется тем, что предложенные модели и алгоритмы могут быть использованы как методологическая и проектная основа для разработки программных модулей интеллектуальной поддержки внутрифирменного планирования на промышленном предприятии. Полученные результаты позволяют проектировать исследовательские и прикладные прототипы, обеспечивающие регистрацию событий отклонения, формирование вариантов управленческого реагирования, передачу сложных или высокорисковых случаев на экспертную валидацию и фиксацию результатов в едином протоколируемом контуре. Это создает основу для повышения воспроизводимости управленческих решений, обеспечения прослеживаемости выбора альтернатив и последующей оценки эффективности интеллектуального контура в сценарно-имитационных или экспериментальных условиях.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ

Методологическая основа исследования включает системный анализ сложных организационно-технических систем, методы формальной постановки задач управления при многокритериальности и неопределенности, событийное описание управленческих процессов, а также принципы алгоритмизации процедур поддержки принятия решений. В данной работе внутрифирменное планирование рассматривается шире, чем процедура подготовки плана и последующего контроля его исполнения. Для промышленного предприятия это связанный управленческий процесс, в котором плановые показатели, фактические данные, события отклонений, ограничения, расчетные процедуры и результаты принятых решений должны образовывать

единую логику обработки. Поэтому в методологическую основу исследования включаются также подходы к построению интеллектуальных модулей диагностики, прогнозирования и сценарной оценки: отклонение в таком контуре требует не только регистрации, но и объяснения причин, оценки возможных последствий и выбора допустимого класса реагирования.

Промышленное предприятие при этом рассматривается как иерархическая организационно-техническая система. В ее состав входят подсистемы производства, снабжения, логистики, качества, технического обслуживания, финансового и планово-экономического управления. Каждая из них имеет собственные показатели, ограничения и информационные потоки, однако в контуре внутрифирменного планирования они должны быть согласованы между собой по ресурсам, срокам, мощностям, затратам и целевым ориентирам. В этой связи отклонение от плана не сводится к простой фиксации нарушения допустимого значения. Оно выступает сигналом, запускающим управленческий цикл корректировки, в ходе которого необходимо определить характер события, его значимость, возможную причину, допустимые варианты воздействия и дальнейший маршрут прохождения управленческого случая.

Системный анализ используется для выделения границ исследуемого контура и описания его основных элементов. К таким элементам относятся входные воздействия, наблюдаемые параметры, внутренние состояния, допустимые классы решений, ресурсные и регламентные ограничения, критерии оценки и выходные результаты. Такое представление позволяет перейти от описания внутрифирменного планирования как совокупности управленческих процедур к формализованной схеме обработки события отклонения. В этой схеме каждый этап имеет заданные входы, правила преобразования, условия перехода и фиксируемый результат, что принципиально важно для последующей алгоритмизации и воспроизводимости принятого решения.

Одним из методических оснований работы является событийное представление управленческого цикла. В качестве начальной единицы функционирования интеллектуального контура принимается событие отклонения, возникающее при нарушении допустимой траектории исполнения плана, выходе показателя за установленные границы, конфликте ограничений либо значимом изменении состояния объекта управления. Такое событие должно иметь идентификатор, временную метку, тип, набор параметров и связь с соответствующим управленческим случаем. Тем самым фиксируется переход от простого наблюдения состояния к управленческой обработке ситуации, требующей интерпретации, оценки и выбора дальнейшего действия.

Событийное описание дополняется алгоритмической логикой обработки. После регистрации события выполняется нормализация входных данных, расчет отклонений и проверка управленческой значимости нарушения. Далее определяются возможные причины, оценивается уровень риска, формируется множество допустимых классов корректирующего реагирования и выбирается маршрут дальнейшего прохождения случая. В зависимости от результатов оценки случай может быть завершен автоматически, направлен на экспертную валидацию, возвращен на пересмотр либо переведен в иной регламентно заданный статус. В такой постановке автоматическая обработка и участие эксперта не противопоставляются друг другу, а выступают связанными элементами единого механизма принятия решения.

Для формального описания работы контура управленческий случай представляется как последовательность переходов между состояниями. В общем виде такая последовательность включает следующие статусы: событие зарегистрировано; отклонение подтверждено; причина оценена; риск определен; воздействие сформировано; решение маршрутизировано; решение подтверждено, отклонено либо направлено на пересмотр; итоговый статус зафиксирован. Данная последовательность задает не административный порядок прохождения заявки, а модель функционирования интеллектуального контура. Каждый переход между состояниями должен иметь основание: рассчитанную величину отклонения, диагностическую оценку, уровень риска, ограничение регламента, результат экспертной проверки или решение о завершении обработки случая.

Для оценки допустимости и качества корректирующих воздействий используется аппарат многокритериального описания и ограничений. Управленческое решение в контуре внутрифирменного планирования должно учитывать сроки исполнения, загрузку мощностей, ресурсную обеспеченность, качество, стоимость, устойчивость плана и допустимый уровень риска. Поэтому выбор корректирующего воздействия задается как процедура оценки множества допустимых альтернатив или классов реагирования в системе критериев, ограничений и риск-параметров. Такой способ описания исключает сведение реакции на отклонение к единичной эвристике и позволяет учитывать влияние выбранного действия на несколько взаимосвязанных подсистем предприятия.

Отдельным элементом методики является формализация экспертного участия. Эксперт в данной работе не рассматривается как внешний по отношению к системе участник, подключаемый после завершения автоматической обработки. Напротив, экспертная валидация включается в структуру интеллектуального контура как один из штатных маршрутов управленческого случая. Основаниями для передачи случая эксперту являются повышенная значимость отклонения, высокая цена ошибки, недостаточная определенность причины, конфликт ограничений либо необходимость подтвердить допустимость выбранного класса реагирования. В рамках исследовательского прототипа экспертная проверка относится преимущественно к уровню управленческого случая: эксперт подтверждает корректность квалификации отклонения, риск-оценки и допустимость дальнейшего прохождения случая по выбранному маршруту.

Воспроизводимость управленческого цикла обеспечивается за счет протоколирования решения. В настоящем исследовании протоколирование понимается не как вспомогательное хранение журналов, а как обязательное условие аудируемости интеллектуального контура. На каждом этапе обработки фиксируются входные данные, рассчитанные отклонения, диагностированная причина, уровень риска, состав допустимых альтернатив или классов реагирования, выбранный маршрут обработки, результат экспертного участия и итоговый статус управленческого случая. Благодаря этому становится возможным восстановить ход обработки события, объяснить основание выбранного решения и сопоставить реакции системы в разных циклах планирования.

Для проверки архитектурной реализуемости предложенных моделей и алгоритмов используется исследовательское прототипирование. Его задача состоит не в создании полнофункциональной промышленной системы, а в демонстрации того, что предложенная формальная постановка может быть переведена в программно реализуемую архитектуру. Такой прототип должен поддерживать регистрацию событий отклонения, обработку управленческих случаев, маршрутизацию решений, экспертную валидацию сложных или высокорисковых ситуаций, фиксацию состояний и протоколирование результата. Поэтому исследовательский прототип рассматривается как средство операционализации ключевых этапов модели, а не как исчерпывающая реализация всех возможных алгоритмов диагностики, прогнозирования и оптимального выбора воздействий.

Таким образом, используемые методы образуют согласованную исследовательскую схему. Системный анализ задает целостное представление контура управления; событийное описание определяет единицу запуска управленческого цикла; алгоритмизация раскрывает порядок обработки отклонений; модель состояний и переходов придает строгость логике функционирования; аппарат критериев и ограничений обеспечивает обоснованный выбор воздействия; исследовательское прототипирование проверяет возможность программной реализации предложенного подхода. В совокупности это позволяет рассматривать интеллектуальный контур не только как архитектурную схему, но и как воспроизводимый механизм обработки управленческих случаев.

Следует подчеркнуть, что интеллектуальность предлагаемого контура не сводится к использованию единой обученной модели. В рамках данной работы интеллектуальный контур понимается как гибридная система, в которой формальные правила, алгоритмы обработки

событий, процедуры риск-оценки, экспертные регламенты и потенциально обучаемые модели образуют согласованную архитектуру поддержки управленческих решений. Обучаемые модели могут применяться в составе когнитивного слоя для диагностики причин отклонений, прогнозирования динамики КРІ и оценки сценариев, тогда как маршрутизация управленческого случая, проверка ограничений, экспертная валидация и протоколирование результата задаются формализованными алгоритмами и правилами. Такое разделение позволяет сочетать адаптивность интеллектуальных методов с требованиями воспроизводимости, объяснимости и управляемости промышленного контура.

### **ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИФИРМЕННЫМ ПЛАНИРОВАНИЕМ**

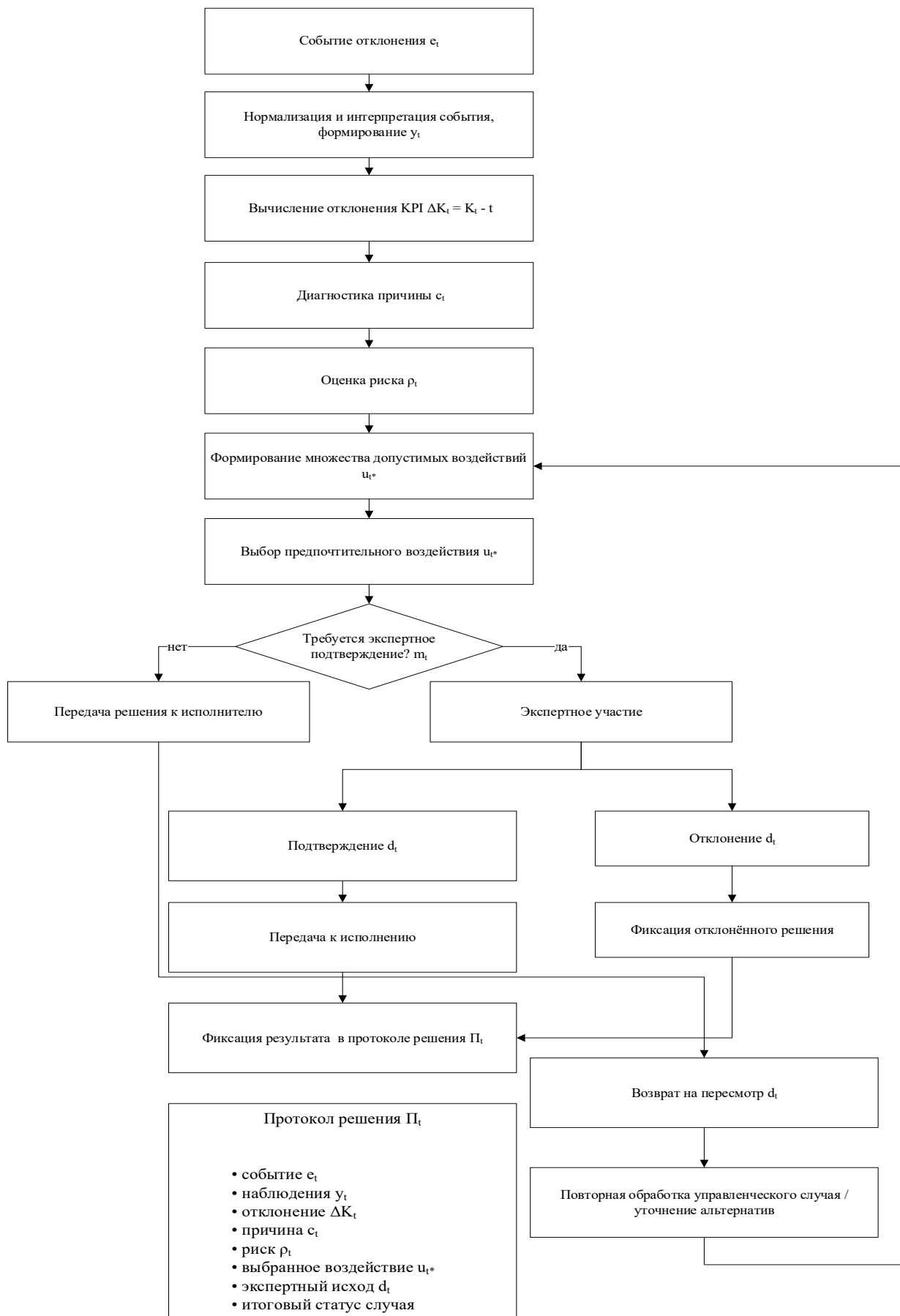
Интеллектуальный контур управления внутрифирменным планированием в настоящей работе рассматривается как формализуемый механизм обработки отклонений, возникающих в ходе исполнения плана. В его составе выделяются состояния, события, вычислительные процедуры и управленческие переходы, которые обеспечивают последовательное движение от наблюдаемого нарушения к управленческому случаю, далее – к выбору класса реагирования и формированию корректирующего воздействия. Принципиальным элементом такого контура является фиксация результата в протоколе решения, поскольку без нее невозможно обеспечить воспроизводимость, последующий анализ и сопоставимость управленческих реакций в разных плановых циклах.

В отличие от описательных подходов к цифровому предприятию, где основное внимание уделяется составу информационных систем, потокам данных и архитектурным слоям, предлагаемый подход акцентирует внимание на логике принятия решения. Контур управления задается не как статическая схема цифровой инфраструктуры, а как нормативно определенная последовательность обработки управленческого случая. Такая последовательность должна обладать наблюдаемостью, воспроизводимостью и явно заданными условиями перехода между этапами: от регистрации события отклонения до выбора варианта реагирования, экспертной проверки при необходимости и протоколирования результата.

Обобщенная структура интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием представлена на рис. 1. Схема отражает переход от события отклонения к квалификации управленческого случая, выбору класса реагирования, возможному экспертному подтверждению и последующей фиксации результата в протоколе решения. Она позволяет показать не только состав элементов контура, но и порядок их взаимодействия в рамках замкнутого управленческого цикла.

На рис. 1 интеллектуальный контур представлен как замкнутая схема обработки управленческого случая. Исходным элементом выступает событие отклонения, после чего выполняются его интерпретация, оценка риска, выбор класса реагирования и, если это предусмотрено условиями маршрутизации, экспертное подтверждение. Существенным элементом предложенной схемы является возврат результата в контур обработки: принятое, отклоненное или направленное на пересмотр решение изменяет статус управленческого случая и становится основанием для дальнейшего движения цикла. Фиксация ключевых этапов в протоколе решения обеспечивает прослеживаемость обработки, позволяет восстановить последовательность действий и тем самым поддерживает воспроизводимость управленческого цикла.

Пусть в дискретный момент времени  $t$  объекту управления соответствует состояние  $x_t \in X$ , где  $X$  – пространство состояний контура внутрифирменного планирования. Состояние  $x_t$  включает параметры, характеризующие текущую производственную, ресурсную и организационную конфигурацию предприятия: плановые показатели, фактические результаты исполнения, доступность мощностей, ограничения снабжения, состояние заказов и иные характеристики, существенные для принятия решения.



**Рис. 1.** Общая схема интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия

Наблюдаемое описание состояния задается вектором  $y_t \in Y$ , где  $Y$  – пространство наблюдений. В его состав включаются плановые и фактические значения показателей, сведения о нарушениях допустимых интервалов, сигналы из корпоративных и производственных систем, данные о загрузке ресурсов и статусах заказов. Формально наблюдение может быть представлено отображением  $y_t = h(x_t, \varepsilon_t)$ , где  $h$  – оператор наблюдения, а  $\varepsilon_t$  – множество шумов, пропусков и задержек измерительной среды. Тем самым интеллектуальный контур работает не с полным знанием состояния объекта управления, а с его наблюдаемым представлением.

Запуск контура осуществляется посредством события  $e_t \in E$ , где  $E$  – множество событий управления. Однако само событие не является полным объектом обработки, поскольку оно фиксирует только факт нарушения или изменения состояния. Для дальнейшей обработки вводится управленческий случай

$$z_t = \langle id, e_t, y_t, \Delta K_t, \delta K_t, q_t, c_t, \rho_t, U_t, U_t^{adm}, u_t^*, m_t, d_t, s_t, \Pi_t \rangle, \quad (1)$$

где  $id$  – идентификатор случая,  $e_t$  – исходное событие отклонения,  $y_t$  – наблюдаемое состояние,  $\Delta K_t$  – вектор отклонений,  $\delta K_t$  – вектор нормированных отклонений,  $q_t$  – класс значимости отклонения,  $c_t$  – диагностированная причина,  $\rho_t$  – оценка риска,  $U_t$  – множество потенциальных вариантов управленческого реагирования,  $U_t^{adm}$  – множество допустимых вариантов реагирования,  $u_t^*$  – выбранный вариант реагирования,  $m_t$  – маршрут обработки,  $d_t$  – результат экспертной валидации при ее наличии,  $s_t$  – итоговый статус управленческого случая в момент времени  $t$ ,  $\Pi_t$  – протокол его обработки.

Такое представление позволяет отделить исходное событие отклонения от управленческого случая как объекта, проходящего последовательную обработку в интеллектуальном контуре. Событие  $e_t$  запускает обработку, тогда как управленческий случай  $z_t$  аккумулирует результаты всех последующих процедур и обеспечивает прослеживаемость перехода от зафиксированного отклонения к выбранному управленческому решению.

Для описания управленческого случая вводится множество статусов  $S$ , отражающих стадии прохождения события через интеллектуальный контур: событие зарегистрировано, нормализовано, отклонение подтверждено, причина оценена, риск определен, множество допустимых классов реагирования или корректирующих воздействий сформировано, предпочтительный вариант выбран, случай передан в автоматический режим либо на экспертную валидацию, решение подтверждено, отклонено или направлено на пересмотр, итог зафиксирован.

Тогда каждый управленческий случай представим как последовательность переходов между статусами  $s_t^{(i)} \in S$ , определяемых результатами вычислительных процедур, проверок ограничений, маршрутизации и экспертного участия. Динамика прохождения управленческого случая по интеллектуальному контуру задается функцией перехода

$$s_t^{i+1} = T(s_t^i, z_t, r_t), \quad (2)$$

где  $s_t \in S$  – итоговый статус управленческого случая в момент времени  $t$ ,  $z_t$  – состояние управленческого случая на момент обработки,  $r_t$  – результат выполненной процедуры. В качестве результатов процедур могут выступать подтверждение факта отклонения, установление причины, получение риск-оценки, формирование непустого множества допустимых альтернатив, выбор предпочтительного варианта, решение о маршрутизации или экспертный исход.

Для исключения неформализованных переходов вводится отношение допустимости:  $G \subseteq S \times S$ , где пара  $(s_i, s_j) \in G$  означает переход из статуса  $s^i$  в статус  $s^j$  разрешен регла-

ментом обработки. Например, переход к экспертной валидации возможен только после расчета риска и выбора варианта реагирования, а перевод случая в итоговый статус возможен только после автоматического подтверждения либо завершения экспертного этапа.

Ключевым элементом модели является система показателей эффективности. Пусть  $K_t = (k_t^{(1)}, k_t^{(2)}, \dots, k_t^{(m)})$  – вектор ключевых показателей, характеризующих исполнение плана и состояние объекта управления в момент времени  $t$ . Для каждого показателя  $k_t^{(i)}$  задаются целевое значение  $\bar{k}_t^{(i)}$  и допустимый интервал  $\underline{k}_t^{(i)} \leq k_t^{(i)} \leq \bar{k}_t^{(i)}, i = 1, \dots, m$ , где  $\underline{k}_t^{(i)}$  и  $\bar{k}_t^{(i)}$  – нижняя и верхняя допустимые границы значения  $i$ -го показателя. В векторной форме область допустимого исполнения плана можно записать как соотношение

$$\Omega_t = \{K_t \in R^m \mid \underline{k}_t^{(i)} \leq k_t^{(i)} \leq \bar{k}_t^{(i)}, i = 1, \dots, m\}, \quad (3)$$

где условие допустимости проверяется отдельно для каждого  $i$ -го показателя.

На основе сопоставления фактических и целевых значений формируется вектор отклонений

$$\Delta K_t = (\Delta k_t^{(1)}, \Delta k_t^{(2)}, \dots, \Delta k_t^{(m)}), \quad (4)$$

где каждая компонента определяется по компонентам:  $\Delta k_t^{(i)} = k_t^{(i)} - \bar{k}_t^{(i)}, i = 1, \dots, m$ . Поскольку показатели могут иметь различную размерность и масштаб, для последующей интегральной оценки используется нормированный вектор отклонений

$$\delta K_t = (\delta k_t^{(1)}, \delta k_t^{(2)}, \dots, \delta k_t^{(m)}), \quad (5)$$

компоненты которого определяются выражением

$$\delta k_t^{(i)} = \frac{k_t^{(i)} - \bar{k}_t^{(i)}}{\bar{k}_t^{(i)} - \underline{k}_t^{(i)} + \varepsilon}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (6)$$

где  $\varepsilon > 0$  – малое число, исключающее деление на ноль. Использование нормированных отклонений позволяет сопоставлять показатели различной природы: сроки, объемы выпуска, загрузку мощностей, затраты, уровень запасов и другие параметры внутрифирменного планирования.

Именно векторы  $\Delta K_t$  и  $\delta K_t$  выступают основанием для перехода от наблюдения состояния объекта управления к управленческой реакции: первый фиксирует абсолютную величину нарушения, второй обеспечивает сопоставимость отклонений при последующей классификации, оценке риска и выборе варианта реагирования.

Для отражения значимости управленческого случая вводится показатель риска  $\rho_t \in R$ , где  $R$  – пространство риск-оценок. Риск управленческого случая целесообразно рассматривать как агрегированную оценку вероятности неблагоприятного развития ситуации и величины возможных последствий. В общем виде

$$\rho_t = g(\delta K_t, q_t, c_t, C_t, H_t), \quad (7)$$

где  $\delta K_t$  – нормированный вектор отклонений,  $q_t$  – класс значимости отклонения,  $c_t$  – диагностированная причина,  $C_t$  – совокупность действующих ограничений,  $H_t$  – контекст управленческого случая, а  $g$  – оператор риск-оценки.

В частном случае риск может быть представлен следующим образом:

$$\rho_t = P_t(c_t \mid e_t, y_t) \cdot L_t(\delta K_t, C_t), \quad (8)$$

где  $P_t(c_t | e_t, y_t)$  – оценка вероятности диагностированной причины при наблюдаемых данных, а  $L_t(\delta K_t, C_t)$  – оценка потенциального ущерба или управленческих потерь при сохранении отклонения либо выборе неадекватного воздействия. В данной модели риск выполняет не только оценочную функцию, но и функцию маршрутизации управленческого случая между автоматическим и экспертным режимами обработки.

Пусть  $U_t = \{u_t^{(1)}, u_t^{(2)}, \dots, u_t^{(n)}\}$  – множество потенциальных вариантов управленческого реагирования, включающее как типовые классы корректирующих действий, так и конкретные воздействия, направленные на возвращение объекта управления в область приемлемого исполнения плана. Индекс  $j$  используется для нумерации вариантов реагирования в множестве  $U_t$ , где  $j = 1, \dots, n$ . С учетом ресурсных, технологических, временных, организационных и регламентных ограничений сначала определяется множество индексов допустимых вариантов:  $I_t^{adm} = \{j \in \{1, \dots, n\} | \eta(u_t^{(j)}, x_t, C_t, H_t) = 1\}$ . Тогда подмножество допустимых вариантов реагирования задается соотношением

$$U_t^{adm} = \{u_t^{(j)} \in U_t | j \in I_t^{adm}\}. \quad (9)$$

Здесь  $\eta(\cdot)$  – индикатор допустимости варианта реагирования,  $x_t$  – текущее состояние объекта управления,  $C_t$  – совокупность действующих ограничений,  $H_t$  – контекст управленческого случая. Значение  $\eta(u_t^{(j)}, x_t, C_t, H_t) = 1$  означает, что вариант  $u_t^{(j)}$  является допустимым в текущих условиях, а значение 0 – что данный вариант исключается из дальнейшего рассмотрения.

Для каждого допустимого варианта реагирования  $u_t^{(j)} \in U_t^{adm}$  вычисляется интегральная оценка ожидаемого результата

$$J(u_t^{(j)}) = \sum_{i=1}^m w_i l_i(\delta k_{t+h}^{(i)}(u_t^{(j)})) + \varphi(u_t^{(j)}, C_t) + \lambda \rho_t(u_t^{(j)}), \quad (10)$$

где  $\delta k_{t+h}^{(i)}(u_t^{(j)})$  – прогнозируемое нормированное остаточное отклонение  $i$ -го показателя после применения варианта  $u_t^{(j)}$  на горизонте  $h$ ;  $w_i \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$  – веса показателей;  $l_i(\cdot)$  – функция потерь по  $i$ -му показателю;  $\varphi(u_t^{(j)}, C_t)$  – штраф за нарушение ресурсных, технологических, регламентных и организационных ограничений;  $\lambda \rho_t(u_t^{(j)})$  – риск-компонента, отражающая ожидаемые последствия выбора данного варианта. Предпочтительный вариант реагирования определяется правилом

$$u_t^* = \operatorname{argmin}_{u_t^{(j)} \in U_t^{adm}} J(u_t^{(j)}). \quad (11)$$

Если множество  $U_t^{adm}$  оказывается пустым, управленческий случай не может быть завершен автоматическим выбором варианта реагирования и должен быть переведен в статус пересмотра или экспертной эскалации. В этом случае в протоколе  $\Pi_t$  фиксируется отсутствие допустимых альтернатив при заданных ограничениях  $C_t$  и текущем контексте  $H_t$ .

Формализация экспертного участия задается множеством допустимых экспертных исходов

$$D_t = \{d_t^{app}, d_t^{rej}, d_t^{rev}\}, \quad (12)$$

где  $d_i^{app}$  – соответствует подтверждению корректности квалификации случая и допустимости выбранного варианта реагирования,  $d_i^{rej}$  – отклонению выбранного варианта, а  $d_i^{rev}$  – направлению управленческого случая на пересмотр. Переход к экспертному этапу определяется функцией маршрутизации

$$m_i = M(\rho_i, q_i, c_i, u_i^*, C_i, H_i), \quad (13)$$

где  $m_i \in \{0, 1\}$ . Значение  $m_i = 0$  означает возможность дальнейшего автоматического прохождения управленческого случая, а значение  $m_i = 1$  – необходимость экспертной валидации. Функция  $M$  может учитывать уровень риска  $\rho_i$ , класс значимости отклонения  $q_i$ , диагностированную причину  $c_i$ , выбранный вариант реагирования  $u_i^*$ , совокупность действующих ограничений  $C_i$  и контекст управленческого случая  $H_i$ .

Если  $m_i = 0$ , выбранный вариант реагирования может быть передан к автоматическому исполнению, детализации или следующему этапу обработки. Если  $m_i = 1$ , интеллектуальный контур переводит управленческий случай в состояние ожидания экспертного решения, а экспертный этап становится формально встроенной частью контура, а не внешним неструктурированным действием.

Для обеспечения воспроизводимости вводится протокол управленческого решения  $\Pi_i$ , который в общем случае задается как структура

$$\Pi_i = \langle id, e_i, y_i, \Delta K_i, \delta K_i, q_i, c_i, \rho_i, U_i, U_i^{adm}, u_i^*, m_i, d_i, s_i, \tau_i, V_i \rangle, \quad (14)$$

где  $id$  – идентификатор управленческого случая,  $e_i$  – исходное событие отклонения,  $y_i$  – наблюдаемое состояние,  $\Delta K_i$  – вектор абсолютных отклонений,  $\delta K_i$  – вектор нормированных отклонений,  $q_i$  – класс значимости отклонения,  $c_i$  – диагностированная причина,  $\rho_i$  – риск-оценка,  $U_i$  – множество рассмотренных вариантов реагирования,  $U_i^{adm}$  – множество допустимых вариантов реагирования,  $u_i^*$  – выбранный вариант реагирования,  $m_i$  – маршрут обработки,  $d_i$  – фактический экспертный исход при его наличии,  $s_i$  – итоговый статус управленческого случая,  $\tau_i$  – временные метки обработки,  $V_i$  – версии использованных правил, моделей и регламентов.

Если экспертная валидация не требуется, компонент  $d_i$  принимает пустое значение или специальное значение  $d_i = \emptyset$ . Если случай передается эксперту, то  $d_i \in D_i$  и отражает один из трех допустимых исходов: подтверждение, отклонение или возврат на пересмотр.

Протокол  $\Pi_i$  фиксирует не только итоговый результат, но и путь его формирования: исходное событие, наблюдаемые данные, абсолютные и нормированные отклонения, класс значимости, диагностированную причину, риск-оценку, состав рассмотренных и допустимых альтернатив, выбранный маршрут обработки, экспертный исход и итоговый статус. За счет этого обеспечиваются прослеживаемость, воспроизводимость и сопоставимость управленческих случаев.

Таким образом, формальная модель интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием включает пространство состояний объекта управления, пространство наблюдений, множество событий, систему статусов и допустимых переходов, вектор показателей и отклонений, функцию оценки риска, множество вариантов управленческого реагирования, правило выбора предпочтительной альтернативы, механизм маршрутизации, формализованное экспертное участие и протокол решения. Предложенная модель задает целостное представление интеллектуального контура как алгоритмизируемой системы обработки управленческих случаев и служит основой для последующего описания алгоритмов обработки отклонений, выбора варианта реагирования и формирования корректирующих воздействий.

### АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ОТКЛОНЕНИЙ И ВЫБОРА КОРРЕКТИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Интеллектуальный контур управления внутрифирменным планированием представляет собой многоуровневую систему, в основе которой лежит формальная модель, описывающая события, управленческие случаи, статусы, переходы, ограничения и варианты реагирования. Однако сама формальная модель задает только структурный каркас контура. Для практической реализации необходимо определить алгоритмическую последовательность обработки события отклонения: от его регистрации и нормализации до расчета отклонений, оценки риска, формирования допустимых вариантов реагирования, выбора предпочтительного варианта и определения дальнейшего маршрута управленческого случая.

В рамках настоящего исследования алгоритмы интерпретируются как упорядоченные последовательности логических и вычислительных преобразований, выполняемых над текущим состоянием управленческого случая  $z_t$ . На вход алгоритмического контура поступают событие отклонения  $e_t$ , наблюдаемые данные  $y_t$ , вектор целевых значений показателей  $\bar{K}_t$ , совокупность покомпонентных допустимых интервалов  $I_t = \{[k_t^{(i)}, \bar{k}_t^{(i)}], i = 1, \dots, m\}$ , совокупность ограничений  $C_t$  и контекст управленческого случая  $H_t$ . Результатом обработки является один из возможных маршрутов: завершение случая без корректирующего воздействия, автоматический выбор варианта реагирования, передача на экспертную валидацию либо возврат на пересмотр при отсутствии допустимых альтернатив или недостаточности данных.

Иницирующим этапом функционирования контура является регистрация события отклонения  $e_t \in E$ . Сигналы об отклонениях могут поступать из системы план-факт анализа, модуля производственного учета, подсистемы контроля исполнения заказов, вычислительного модуля мониторинга КРП и иных корпоративных или производственных информационных систем. После регистрации событие связывается с объектом управления и преобразуется в управленческий случай  $z_t$ , которому присваивается начальный статус обработки.

Ключевой сложностью на этом этапе является разнородность поступающих данных. Источники могут отличаться форматом представления информации, уровнем детализации, периодичностью обновления и полнотой наблюдаемых параметров. Для преодоления этой сложности применяется процедура нормализации, преобразующая разнородные сигналы в унифицированное наблюдаемое описание  $y_t$ .

В результате нормализации событие отклонения получает структурированное описание, включающее идентификатор управленческого случая, тип зафиксированного отклонения, ссылку на объект управления, временную метку обнаружения, набор ключевых наблюдаемых параметров и контекст возникновения отклонения. Унификация данных обеспечивает сопоставимость разнородных событий, однозначную привязку каждого отклонения к конкретному управленческому случаю и возможность применения единых алгоритмических правил обработки.

После нормализации выполняется алгоритм вычисления отклонений и контроля допустимой области исполнения плана. Пусть фактические значения ключевых показателей в момент времени  $t$  заданы вектором

$$K_t = (k_t^{(1)}, k_t^{(2)}, \dots, k_t^{(m)}), \quad (15)$$

а целевые значения – вектором

$$\bar{K}_t = (\bar{k}_t^{(1)}, \bar{k}_t^{(2)}, \dots, \bar{k}_t^{(m)}). \quad (16)$$

Тогда вектор абсолютных отклонений определяется как  $\Delta K_t = (\Delta k_t^{(1)}, \Delta k_t^{(2)}, \dots, \Delta k_t^{(m)})$ , где для каждого  $i$ -го показателя  $\Delta k_t^{(i)} = k_t^{(i)} - \bar{k}_t^{(i)}$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Поскольку показатели внутрифирменного планирования могут иметь различную размерность и масштаб, дополнительно рассчитывается нормированный вектор отклонений

$$\delta K_t = (\delta k_t^{(1)}, \delta k_t^{(2)}, \dots, \delta k_t^{(m)}), \quad (17)$$

где  $\delta k_t^{(i)} = \frac{k_t^{(i)} - \bar{k}_t^{(i)}}{\bar{k}_t^{(i)} - \underline{k}_t^{(i)} + \varepsilon}$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Здесь  $\underline{k}_t^{(i)}$  и  $\bar{k}_t^{(i)}$  – нижняя и верхняя допустимые границы  $i$ -го показателя, а  $\varepsilon > 0$  – малое число, исключающее деление на ноль. Далее проверяется принадлежность текущего состояния области допустимого исполнения плана:  $K_t \in \Omega_t$ , где область допустимого исполнения плана задается соотношением

$$\Omega_t = \{K_t \in R^m \mid \underline{k}_t^{(i)} \leq k_t^{(i)} \leq \bar{k}_t^{(i)}, i = 1, \dots, m\}. \quad (18)$$

Если все показатели, включенные в проверку, удовлетворяют указанным условиям, то  $K_t \in \Omega_t$ . Иными словами, принадлежность  $K_t$  множеству  $\Omega_t$  означает одновременное выполнение всех покомпонентных условий допустимости для показателей, включенных в проверку. Если хотя бы для одного показателя условие нарушается, то  $K_t \notin \Omega_t$ , а управленческий случай переводится в статус подтвержденного отклонения.

Последовательность алгоритмической обработки управленческого случая, возникающего при отклонении показателей от допустимой траектории исполнения плана, представлена на рис. 2. Схема отражает переход от регистрации события отклонения к расчету отклонений, проверке допустимой области, классификации значимости нарушения, диагностике причины, оценке риска, формированию множества потенциальных воздействий, фильтрации допустимых вариантов, выбору предпочтительной альтернативы и определению дальнейшего маршрута управленческого случая.

Как видно из рис. 2, выбор управленческого воздействия в интеллектуальном контуре не является непосредственной реакцией на сам факт отклонения. Между выявлением нарушения и принятием решения располагается несколько процедурных этапов: классификация значимости отклонения, диагностика возможной причины, оценка риска и проверка допустимых альтернатив. Благодаря этому реакция формируется не на основе единичной экспертной интерпретации, а в рамках заданной логики обработки управленческого случая. В зависимости от степени детализации модели результатом данного этапа может выступать либо конкретное корректирующее воздействие, либо укрупненный класс реагирования, который затем уточняется с учетом производственных, ресурсных и регламентных условий.

Дифференциация реакции на нарушения выполняется с помощью алгоритма классификации отклонений по степени значимости. В рамках данного алгоритма отклонения разделяются на локальные, существенные и критические. Основанием для такого разделения служат величина нормированного отклонения, количество затронутых показателей, устойчивость отклонения во времени, наличие активных ограничений и потенциальная стоимость управленческой ошибки. Такая классификация задает начальную траекторию обработки случая: часть отклонений может проходить по автоматическому маршруту, тогда как более значимые или рискованные случаи требуют дополнительной проверки либо экспертного участия.

В общем виде функция классификации может быть представлена как соотношение (20):

$$q_t = \chi(\delta K_t, C_t, H_t), \quad (20)$$

где  $q_t \in Q$  – класс значимости отклонения ( $Q = \{q^{loc}, q^{sig}, q^{crit}\}$  – множество допустимых классов значимости),  $\delta K_t$  – нормированный вектор отклонений,  $C_t$  – множество ресурсных, технологических, временных, организационных и регламентных ограничений, действующих в момент времени  $t$ ,  $H_t$  – контекст управленческого случая, а  $\chi$  – оператор классификации. Такая классификация определяет глубину дальнейшего анализа и маршрут прохождения управленческого случая.

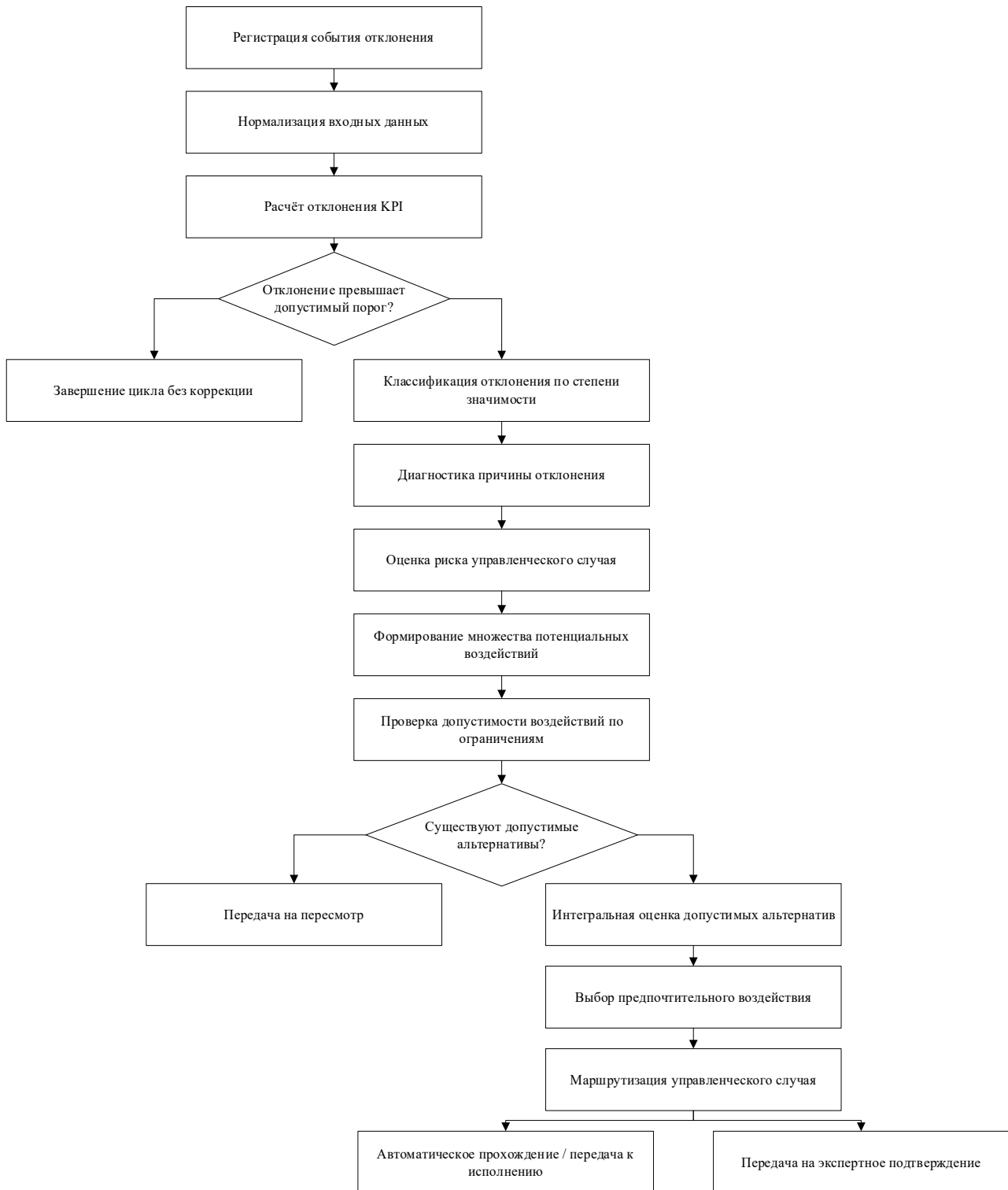


Рис. 2. Алгоритм обработки отклонения и выбора корректирующего воздействия в интеллектуальном контуре управления

Следующим этапом является алгоритм диагностики причины отклонения. В рамках настоящей статьи предполагается, что интеллектуальный контур формирует наиболее вероятную гипотезу о причине нарушения допустимой траектории исполнения плана (21):

$$c_t = \psi(e_t, y_t, \delta K_t, H_t), \quad (21)$$

где  $c_t$  – диагностированная причина отклонения,  $e_t$  – структурированная запись о событии отклонения, включающая тип нарушения, временную метку, идентификатор объекта управления и связанные с событием параметры,  $y_t$  – наблюдаемое состояние объекта управления, а  $\psi$  – оператор причинной интерпретации. Диагностика необходима не только для объяснения отклонения, но и для связи нарушения с областью возможных управленческих реакций. В зависимости от состава доступных данных такая диагностика может быть реализована на основе правил, причинно-следственных графов, статистических зависимостей или обучаемых моделей, однако в любом случае ее результат должен быть представлен в протоколируемой и проверяемой форме.

После получения диагностической гипотезы выполняется алгоритм оценки риска управленческого случая. С учетом ранее введенной формализации риск рассчитывается как функция нормированного отклонения, класса значимости, диагностированной причины, ограничений и контекста (22):

$$\rho_t = g(\delta K_t, q_t, c_t, C_t, H_t), \quad (22)$$

где  $g$  – оператор оценки риска.

В частном случае риск может быть представлен произведением вероятностной и ущербной составляющих (23):

$$\rho_t = P_t(c_t | e_t, y_t) \cdot L_t(\delta K_t, C_t). \quad (23)$$

После оценки риска формируется множество потенциальных вариантов управленческого реагирования  $U_t$ , включающее как укрупнённые классы реакции, так и конкретные корректирующие воздействия. Далее с учётом ограничений  $C_t$  и контекста  $H_t$  выделяется множество допустимых вариантов  $U_t^{adm}$ . Если  $U_t^{adm} = \emptyset$ , управленческий случай переводится в состояние пересмотра или экспертной эскалации. Если допустимые варианты существуют, для каждого  $u_t^{(j)} \in U_t^{adm}$  рассчитывается интегральная оценка  $J(u_t^{(j)})$ , после чего выбирается предпочтительный вариант  $u_t^*$ . На завершающем этапе функция маршрутизации  $M$  определяет, может ли выбранный вариант пройти автоматически либо должен быть передан на экспертную валидацию. Тем самым алгоритмический цикл завершается не только оценкой риска, но и выбором маршрута дальнейшего прохождения управленческого случая.

Алгоритмическая роль риска состоит в том, что он задает основание для маршрутизации случая между автоматическим и экспертным режимами обработки, а также определяет требуемую глубину анализа альтернатив.

Такой порядок обеспечивает алгоритмическую завершенность контура и поддерживает воспроизводимость управленческого цикла. Событие отклонения в данной логике не остается отдельным сигналом мониторинга, а проходит полный путь управленческой обработки: от регистрации и квалификации до выбора варианта реагирования и фиксации результата. При дальнейшем развитии исследовательского прототипа выбранный вариант может быть конкретизирован до корректирующего воздействия, связанного с производственными, снабженческими, логистическими или планово-экономическими параметрами предприятия.

#### АРХИТЕКТУРА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОТОТИПА

Для проверки архитектурной реализуемости предложенных формальных моделей и алгоритмов разработан исследовательский программный прототип интеллектуального контура

управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия. Прототип имеет демонстрационный характер и предназначен для проверки того, могут ли введенные в работу сущности, статусы, алгоритмические этапы, правила маршрутизации и механизм экспертной валидации быть представлены в виде согласованной программной конфигурации. В данной реализации управленческий случай проходит основные стадии формализованного цикла: регистрацию события отклонения, вычислительную обработку, определение маршрута, экспертную валидацию при выполнении заданных условий и фиксацию итогового статуса в протоколе решения.

Архитектура прототипа построена как трехслойная система. В ее составе выделяются вычислительно-алгоритмический слой, слой хранения состояний и протоколов, а также слой экспертной валидации. Вычислительно-алгоритмический слой выполняет прием события, нормализацию данных, расчет отклонений, диагностику причины, оценку риска, выбор варианта реагирования и определение маршрута дальнейшей обработки. Результаты расчетов связываются со статусами управленческого случая: после обработки случай может быть завершен автоматически, передан на экспертную валидацию либо возвращен на уточнение.

Слой хранения состояний и протоколов фиксирует данные, сопровождающие прохождение управленческого случая через интеллектуальный контур: параметры исходного события, текущий статус, рассчитанные отклонения, диагностированную причину, риск-оценку, выбранный вариант реагирования, маршрут обработки, экспертный исход и итоговый статус. В структуре хранения различаются карточка управленческого случая и журнал его прохождения. Карточка отражает актуальное состояние случая, а журнал сохраняет последовательность этапов обработки, что позволяет восстановить логику формирования решения.

Слой экспертной валидации обеспечивает включение человека в контур принятия решения. Эксперт получает доступ не к неструктурированному сообщению о проблеме, а к подготовленному управленческому случаю, содержащему исходные данные, результаты расчетов, риск-оценку, выбранный вариант реагирования и основание передачи на проверку. По результатам валидации эксперт может подтвердить предложенный вариант, отклонить его либо вернуть случай на пересмотр. Результат экспертного участия возвращается в общий контур: статус случая обновляется, а очередной этап фиксируется в протоколе.

Предложенная архитектура показывает возможность программного замыкания цикла «событие отклонения – вычислительная обработка – экспертная валидация – статусный возврат результата – протоколирование». В такой конфигурации событие отклонения не ограничивается регистрацией в информационной системе, а преобразуется в управленческий случай, который проходит последовательную обработку с сохранением промежуточных состояний, маршрута и итогового решения. Тем самым исследовательский прототип показывает, что формальные элементы модели – событие  $e_i$ , управленческий случай  $z_i$ , статус  $s_i$ , маршрут  $m_i$ , экспертный исход  $d_i$  и протокол решения  $\Pi_i$  – могут быть объединены в единую программную архитектуру интеллектуального контура внутрифирменного планирования.

Соотношение формальной модели, алгоритмических процедур и программной реализации представлено в табл. 1. В таблице каждому этапу интеллектуального контура сопоставлены используемые формальные сущности, функция обработки управленческого случая и соответствующий компонент исследовательского прототипа. Такое сопоставление показывает, какие элементы предложенной модели получили архитектурное выражение в программной конфигурации. При этом таблица характеризует именно уровень реализуемости модели в исследовательском прототипе и не претендует на описание полной промышленной системы, включающей все возможные алгоритмы диагностики, прогнозирования и выбора корректирующих воздействий.

Таблица 1

## Соответствие этапов обработки управленческого случая, формальных сущностей, алгоритмических процедур и компонентов исследовательского прототипа

№ п/п	Этап обработки управленческого случая	Формальная сущность	Алгоритмическая процедура	Компонент исследовательского прототипа
1	Регистрация управленческого случая.	Событие отклонения $e_t$ .	Прием и идентификация события.	Оркестрационный контур обработки события.
2	Приведение события к унифицированному виду.	Нормализованное событие, набор наблюдаемых параметров $y_t$ .	Нормализация входных полей и проверка полноты данных.	Вычислительно-алгоритмический слой.
3	Подтверждение факта нарушения.	Отклонения $\Delta K_t$ , $\delta K_t$ , область допустимости $\Omega_t$ .	Расчет отклонений и контроль допустимых границ.	Модуль вычисления отклонений.
4	Интерпретация характера отклонения.	Класс значимости $q_t$ .	Классификация отклонения по степени значимости.	Модуль логики обработки случая.
5	Формирование гипотезы о причине.	Диагностированная причина $c_t$ .	Диагностика причины отклонения.	Модуль причинной интерпретации.
6	Оценка потенциальных последствий.	Риск-оценка $\rho_t$ .	Расчет риск-оценки управленческого случая.	Модуль оценки риска.
7	Формирование допустимого множества вариантов реагирования.	Варианты реагирования $U_t, U_t^{adm}$ .	Генерация и фильтрация вариантов реагирования по ограничениям.	Модуль формирования и фильтрации управленческих альтернатив.
8	Выбор предпочтительного варианта реагирования.	Выбранный вариант $u_t^*$ .	Интегральная оценка альтернатив и выбор предпочтительного варианта.	Модуль алгоритмического выбора или предварительного ранжирования решения.
9	Определение маршрута дальнейшей обработки.	Маршрут обработки $m_t$ .	Маршрутизация управленческого случая в автоматический режим или режим экспертной валидации.	Оркестрационный слой управления статусами.
10	Передача случая на экспертную валидацию.	Статус ожидания экспертной валидации.	Перевод управленческого случая в режим экспертной проверки.	Слой хранения карточек управленческих случаев.
11	Экспертная валидация управленческого случая.	Экспертный исход $d_t$ .	Подтверждение, отклонение или возврат на пересмотр выбранного варианта реагирования.	Слой экспертной валидации.
12	Статусный возврат результата в контур обработки.	Обновленный статус $s_t$ .	Обработка результата экспертной валидации и изменение статуса случая.	Оркестрационный контур обновления статусов.
13	Протоколирование результата обработки.	Протокол $P_t$ .	Сохранение параметров события, этапов обработки, экспертного исхода и итогового статуса.	Слой хранения протоколов обработки.

Данные табл. 1 показывают связь между тремя уровнями описания интеллектуального контура: формальной моделью, алгоритмической логикой обработки и программно-архитектурной реализацией. Для каждого этапа прохождения управленческого случая указаны соответствующая формальная сущность, процедура обработки и компонент исследовательского прототипа, через который реализуется необходимый статусный переход. Тем самым таблица

отражает не отдельный перечень функций, а последовательность операционализации предложенной модели в программной среде. Представленная выше структура может использоваться как основа для последующей детализации алгоритмов диагностики, прогнозирования и выбора корректирующих воздействий.

Архитектура исследовательского прототипа подтверждает, что интеллектуальный контур управления внутрифирменным планированием может быть представлен в виде трехслойной системы. Вычислительно-алгоритмический слой выполняет обработку событий отклонения и выбор варианта реагирования; слой хранения фиксирует состояние управленческих случаев, их статусы и протоколы прохождения; слой экспертной валидации включает формализованное участие человека в цикле принятия решения. Фиксация экспертного исхода, обновление статуса случая и запись результата в протокол показывают архитектурную реализуемость ключевых стадий замкнутого управленческого цикла. Также следует уточнить, что прототип не претендует на исчерпывающее воспроизведение всех исполнительных механизмов промышленного планирования.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования сформирована целостная формальная и алгоритмическая схема интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия, в которой событие отклонения рассматривается как входная единица запуска управленческого цикла, а итоговый вариант управленческого реагирования – как результат последовательного прохождения стадий обработки, включающих интерпретацию состояния, оценку риска, выбор допустимой альтернативы, экспертную валидацию в необходимых случаях и фиксацию результата в протоколе. Тем самым предложенная модель объединяет вычислительный, управленческий, экспертный и протокольный уровни в рамках единого контура.

Первый существенный результат заключается в том, что внутрифирменное планирование представлено не как совокупность разрозненных процедур планирования, согласования и план-факт анализа, а как формализуемая система обработки управленческих случаев. Это позволяет перейти от описательного представления деятельности предприятия к модели, в которой каждый случай нарушения допустимой траектории исполнения становится объектом структурированной обработки и алгоритмизации.

Второй результат состоит в формализации событийной природы интеллектуального контура. Запуск управленческого цикла связывается не с абстрактной необходимостью корректировки, а с конкретным событием отклонения, имеющим идентификатор, временную метку, набор наблюдаемых параметров и связь с определенным случаем. Такая постановка обеспечивает сопоставимое протоколирование и программную реализацию контура как системы управляемых переходов между статусами.

Третьим значимым результатом является разработка алгоритмической последовательности обработки отклонений, включающей регистрацию события, вычисление отклонения, классификацию его значимости, диагностику причины, оценку риска, формирование допустимых вариантов реагирования и выбор предпочтительной альтернативы. Тем самым сокращается разрыв между фиксацией отклонения и последующим управленческим реагированием: выбор варианта реагирования становится результатом воспроизводимой процедуры, основанной на анализе множества альтернатив в системе критериев и ограничений. В целевой модели данный вариант может быть детализирован до конкретного корректирующего воздействия, связанного с производственными, снабженческими, логистическими или планово-экономическими параметрами.

Особое значение имеет включение риска в структуру контура. В предлагаемой модели риск выполняет не только оценочную функцию, но и функцию маршрутизации управленческого случая. Это позволяет различать ситуации, допускающие автоматическое прохождение,

случаи, требующие экспертной валидации, а также ситуации, в которых необходима дополнительная детализация корректирующего воздействия. Тем самым риск связывает алгоритмическую обработку с регламентированным управленческим подтверждением и задает глубину дальнейшей обработки случая.

Отдельным результатом является формализация экспертного участия как штатного элемента интеллектуального контура. Экспертный этап включается по формально заданным условиям маршрутизации и завершается ограниченным множеством исходов: подтверждением выбранного варианта реагирования, его отклонением или возвратом случая на пересмотр. В рамках исследовательского прототипа экспертная валидация относится преимущественно к уровню управленческого случая: эксперт подтверждает корректность квалификации отклонения, риск-оценки и допустимость дальнейшего прохождения случая по выбранному маршруту. Благодаря этому экспертное участие включается в общую модель без разрушения требований к прослеживаемости и воспроизводимости.

Существенным результатом работы является также введение протокольного уровня как обязательного элемента интеллектуального контура. Каждый управленческий случай сопровождается формализованным протоколом, содержащим сведения о входном событии, наблюдаемых значениях, отклонениях, диагностированной причине, уровне риска, допустимых альтернативах, выбранном варианте реагирования, экспертном исходе, маршруте обработки и итоговом статусе. Это обеспечивает не только фиксацию результата, но и восстановимость пути его формирования.

Исследовательский программный прототип (<https://gas.elforecasting.com/>) показал архитектурную реализуемость ключевых стадий предложенной модели. Показано, что введенные сущности, статусы, алгоритмы маршрутизации, протоколы и правила экспертного участия могут быть сопоставлены с программной конфигурацией, в которой вычислительно-алгоритмический слой обрабатывает события и формирует вариант реагирования, слой хранения фиксирует состояние случая и протокол его прохождения, а слой экспертной валидации обеспечивает участие человека в предусмотренных моделью ситуациях.

Принципиально важно, что прототип демонстрирует возможность статусного замыкания цикла «событие → обработка → экспертная валидация → обновление статуса → протоколирование результата».

К сильным сторонам предложенного подхода относятся структурированное представление внутрифирменного планирования как управляемого интеллектуального контура, алгоритмизация ранее слабо формализованных этапов управленческого цикла, включение экспертного участия в статусную и протокольную логику обработки, а также совместимость модели с современными цифровыми средствами наблюдения и оркестрации процессов. Наличие исследовательского прототипа дополнительно подтверждает операциональную определенность модели и показывает возможность ее дальнейшего развития в направлении более детализированных алгоритмов диагностики, прогнозирования и выбора корректирующих воздействий.

Вместе с тем предложенный подход имеет ограничения. Представленная модель ориентирована на исследовательский уровень формализации и не претендует на полное воспроизведение всей сложности внутрифирменного планирования реального промышленного предприятия. Алгоритмы диагностики причины и оценки риска в рамках исследовательского прототипа носят укрупненный характер и служат прежде всего для демонстрации логики интеллектуального контура. Кроме того, в текущей версии прототипа экспертная валидация относится преимущественно к уровню управленческого случая и выбранного варианта реагирования, тогда как детализация реагирования до конкретных исполнительных действий требует дальнейшей проработки. Практическая устойчивость подхода зависит от качества входных данных, полноты наблюдаемого состояния, зрелости регламентов и возможности выделения формализуемых классов корректирующих воздействий.

Важно подчеркнуть отличие настоящей статьи от ранее выполненных исследований. Если в предшествующей работе основной акцент был сделан на системной постановке задачи и общей архитектурной рамке интеллектуального контура управления, а в последующих разработках – на процессной модели согласовательного контура IBP/S&OP и на отдельных алгоритмических процедурах мониторинга KPI и выбора корректирующих воздействий, то в настоящем исследовании эти элементы сведены в единую формальную и алгоритмическую модель функционирования интеллектуального контура внутрифирменного планирования. Тем самым новизна данного этапа состоит в синтезе событийной, алгоритмической, экспертной и протокольной составляющих в рамках единой модели обработки управленческого случая.

Таким образом, полученные результаты показывают, что интеллектуальный контур управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия может быть описан как формальная и алгоритмируемая система, соединяющая наблюдение отклонений, оценку риска, выбор варианта управленческого реагирования, экспертную валидацию и фиксацию результата в структуре воспроизводимого управленческого цикла. Это позволяет рассматривать предложенный подход как методическую основу для дальнейшего развития интеллектуальных средств поддержки принятия решений в промышленном управлении, включая последующую детализацию корректирующих воздействий, развитие прогнозно-диагностических модулей и сценарно-имитационную верификацию.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработаны формальные модели и алгоритмы интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия, обеспечивающие алгоритмируемое преобразование события отклонения в управленческий случай и последующий выбор обоснованного варианта реагирования с учетом ограничений, уровня риска и экспертного участия. В отличие от подходов, ограничивающихся регистрацией отклонений или локальными аналитическими процедурами, предложенная модель представляет внутрифирменное планирование как целостный интеллектуальный контур, объединяющий события, состояния, вычислительные процедуры, статусные переходы, экспертную валидацию и протоколирование результата в рамках единого управленческого цикла.

Основной результат работы состоит в переходе от общей архитектурной постановки и частных алгоритмических решений к интегрированной формальной и алгоритмической модели функционирования интеллектуального контура. Показано, что такой контур может быть описан через пространство состояний, наблюдаемых параметров, событий отклонения, множество допустимых вариантов управленческого реагирования, правило выбора предпочтительной альтернативы и механизм маршрутизации случая в зависимости от уровня риска, регламентных условий и необходимости экспертной валидации.

Практическая значимость результатов определяется тем, что предложенные модели и алгоритмы могут использоваться как основа для построения исследовательских и прикладных программных модулей интеллектуальной поддержки внутрифирменного планирования. Разработанный исследовательский прототип подтвердил архитектурную реализуемость ключевых стадий предложенного подхода и показал возможность построения системы, в которой событие отклонения проходит через последовательность алгоритмических этапов, при необходимости передается на экспертную валидацию, получает обновленный статус и фиксируется в протоколе прохождения управленческого случая.

Перспективы дальнейшей работы связаны с углублением методов диагностики причин отклонений, развитием риск-ориентированных моделей выбора корректирующих воздействий, детализацией вариантов реагирования до уровня конкретных исполнительных действий, расширением формализуемых сценариев экспертного участия и последующей верификацией предложенного подхода в сценарно-имитационных экспериментах.

## БЛАГОДАРНОСТИ И ПОДДЕРЖКА

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания для высших учебных заведений #FRRR2026-0006.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [Ain25] Ain N. U., DeLone W. H., Vaia G. Measuring the success of business intelligence and analytics systems: A literature review // *Technovation*. 2025. Vol. 146. Art. 103277. DOI: 10.1016/j.technovation.2025.103277. [QLYMEA](#).
- [Bha23] Bhalla S., Alfnes E., Hvolby H. H., Oluyisola O. Sales and operations planning for delivery date setting in engineer-to-order manufacturing: a research synthesis and framework // *International Journal of Production Research*. 2023. Vol. 61, no. 21. pp. 7302–7332. DOI: 10.1080/00207543.2022.2148010. [ZRFNFD](#).
- [But23] Butarbutar Z. T., Handayani P. W., Suryono R. R., Wibowo W. S. Systematic literature review of critical success factors on enterprise resource planning post implementation // *Cogent Business & Management*. 2023. Vol. 10, no. 3. Art. 2264001. DOI: 10.1080/23311975.2023.2264001. [QVMGVG](#).
- [Fen24] Feng C., Ali D. A. Leveraging Digital Transformation and ERP for Enhanced Operational Efficiency in Manufacturing Enterprises // *Journal of Law and Sustainable Development*. 2024. Vol. 12, no. 3. Art. e02455. DOI: 10.55908/sdgs.v12i3.2455. [GLVHNP](#).
- [Kim24] Kim S., Shin K. Comparative Analysis of Key Success Factors in S&OP: Focusing on Manufacturing and Retail Industry in South Korea // *Systems*. 2024. Vol. 12, no. 6. Art. 202. DOI: 10.3390/systems12060202. [SFNMOT](#).
- [Kos24] Kostopoulos G., Davrazos G., Kotsiantis S. Explainable Artificial Intelligence-Based Decision Support Systems: A Recent Review // *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 14. Art. 2842. DOI: 10.3390/electronics13142842. [BBROGK](#).
- [Oks24] Oks S. J., Jalowski M., Lechner M., Mirschberger S., Merklein M., Vogel-Heuser B., Möslin K. M. Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook // *Information Systems Frontiers*. 2024. Vol. 26. pp. 1731–1772. DOI: 10.1007/s10796-022-10252-x. [FHDLMI](#).
- [Put24] Putra H., Mahendrawathi E. R. The Role of Business Process Management in Digital Innovation and Digital Transformation: A Systematic Literature Review // *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 234. pp. 829–836. DOI: 10.1016/j.procs.2024.03.069. [MHGLTS](#).
- [Soo26] Soori M., Karimi Ghaleh Jough F., Dastres R., Arezoo B. AI-based decision support systems in Industry 4.0, a review // *Journal of Economy and Technology*. 2026. Vol. 4. pp. 206–225. DOI: 10.1016/j.ject.2024.08.005. [YEFIZQ](#).
- [Stu22] Stüve D., van der Meer R., Ali Agha M. S., Lütke Entrup M. A systematic literature review of modelling approaches and implementation of enabling software for supply chain planning in the food industry // *Production and Manufacturing Research*. 2022. Vol. 10, no. 1. pp. 470–493. DOI: 10.1080/21693277.2022.2091057. [UKOXLR](#).
- [Yur22] Yurtay Y. Process Mining in Manufacturing: A Literature Review // *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 5, no. 3. pp. 341–355. DOI: 10.35377/saucis.05.03.1134293. [MGCMXF](#).
- [Ады26] Адышкин С. С., Пальчевский Е. В. Интеллектуальная архитектура контура внутрифирменного планирования промышленного предприятия: системный анализ и формализация задачи // *СИИТ*. 2026. Т. 8, № 2(26). С. 3–19. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no2-p3. [CPWXAA](#). [[Adyshkin S. S., Palchevsky E. V. “Intelligent architecture of the internal planning circuit of an industrial enterprise: system analysis and formalization of the problem” // *SIIT*. 2026. Vol. 8, no. 2(26), pp. 3–19. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no2-p3. [CPWXAA](#). (In Russian).]]
- [Род23] Родионова Л. Е., Антонов В. В., Баймурзина Л. И., Гидинда Г. М. Модели проектирования программных аналитических комплексов с декартово замкнутой категорией // *СИИТ*. 2023. Т. 5, № 5(14). С. 3–15. [AQLGLE](#). [[Rodionova L. E., Antonov V. V., Baymurzina L. I., Gidinda G. M. Models for designing software analytical complexes with a Cartesian closed category // *SIIT*. 2023. Vol. 5, no. 5(14). pp. 3–15. [AQLGLE](#). (in Russian).]]

## ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

**АДЫШКИН Сергей Сергеевич**

МИРЭА – Российский технологический университет.  
[adyshkinss@gmail.com](mailto:adyshkinss@gmail.com) ORCID: 0009-0001-5764-0768.  
 Ст. преп. каф. индустриального программирования. Специалист (Мордовск. гос. пед. ин-т им. М. Е. Евсевьева).  
 Иссл. в обл. интеллектуальных вычислений и систем.

**ПАЛЬЧЕВСКИЙ Евгений Владимирович**

МИРЭА – Российский технологический университет.  
[teelxp@inbox.ru](mailto:teelxp@inbox.ru) ORCID: 0000-0001-9033-5741.  
 Доц. каф. индустриального программирования. Магистр (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т). Канд техн. наук (там же).  
 Иссл. в обл. интеллектуальных вычислений и систем.

**ADYSHKIN Sergey Sergeevich**

MIREA — Russian Technological University.  
[adyshkinss@gmail.com](mailto:adyshkinss@gmail.com) ORCID: 0009-0001-5764-0768.  
 Senior Lecturer, Dept of Industrial Programming. Specialist degree (Mordovian State Pedagogical Institute). Research interests: intelligent computing and intelligent systems.

**PALCHEVSKY Evgeny Vladimirovich**

MIREA — Russian Technological University.  
[teelxp@inbox.ru](mailto:teelxp@inbox.ru) ORCID: 0000-0001-9033-5741.  
 Assoc. Prof., Dept. of Industrial Programming. M.Sc. (Ufa State Aviation Technical University). Ph.D. (Engineering) (ibid). Research interests: intelligent computing and intelligent systems.

**АНТОНОВ Вячеслав Викторович**

Уфимский университет науки и технологий, Россия.  
antonov.v@bashkortostan.ru ORCID: 0000-0002-5402-9525.  
Зав. каф. автоматизированных систем управления. Д-р техн. наук (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т). Иссл. в обл. интеллектуальных вычислений и систем.

**ANTONOV Vyacheslav Viktorovich**

Ufa University of Science and Technology, Russia.  
antonov.v@bashkortostan.ru ORCID: 0000-0002-5402-9525.  
Head of the Dept. of Automated Control Systems. Dr. of Technical Sciences, Professor (Ufa State Aviation Technical University). Research interests: intelligent computing and systems.

**МЕТАДАННЫЕ | METADATA**

**Заглавие:** Формальные модели и алгоритмы интеллектуального контура обработки управленческих случаев во внутрифирменном планировании промышленного предприятия.

**Авторы:** Адышкин С. С., Пальчевский Е. В., Антонов В. В.

**Аннотация:** В статье рассматривается задача формализации интеллектуального контура управления внутрифирменным планированием промышленного предприятия. Актуальность исследования обусловлена тем, что современные ERP-, MES-, APS- и BI-системы позволяют оперативно фиксировать отклонения плановых показателей, однако сами по себе не обеспечивают формально заданный переход от обнаруженного нарушения к выбору обоснованного управленческого реагирования. В результате между информационно-аналитическим контуром и контуром принятия решений сохраняется разрыв, снижающий воспроизводимость и объяснимость управленческих действий. Цель работы состоит в разработке формальных моделей и алгоритмов, обеспечивающих преобразование события отклонения в управленческий случай с последующей оценкой его значимости, диагностикой причины, расчетом риска, выбором допустимого варианта реагирования, маршрутизацией и протоколированием результата. Предложена модель управленческого случая, включающая событие отклонения, наблюдаемое состояние, абсолютные и нормированные отклонения KPI, класс значимости, диагностированную причину, риск-оценку, множество допустимых вариантов реагирования, выбранное воздействие, маршрут обработки, экспертный исход и протокол решения. Формализованы статусы обработки случая, допустимые переходы между ними, правила оценки отклонений, механизм выбора предпочтительного варианта и условия передачи случая на экспертную валидацию. Практическая реализуемость подхода показана на уровне исследовательского программного прототипа, включающего вычислительно-алгоритмический слой, слой хранения состояний и протоколов, а также слой экспертной валидации. Полученные результаты могут использоваться как методическая основа для разработки интеллектуальных модулей поддержки внутрифирменного планирования, обеспечивающих прослеживаемость, воспроизводимость и формализованное сопровождение управленческих решений.

**Ключевые слова:** Внутрифирменное планирование; интеллектуальный контур управления; управленческий случай; событие отклонения; KPI; риск-оценка; экспертная валидация; протоколирование решений; промышленное предприятие.

**Язык:** Русский.

Статья поступила в редакцию 8 мая 2026 г.

**Title:** Formal models and algorithms of an intelligent control loop for processing management cases in intrafirm planning of an industrial enterprise.

**Authors:** Adyshkin S. S., Palchevsky E. V., Antonov V. V.

**Abstract:** The article addresses the problem of formalizing an intelligent control loop for intrafirm planning at an industrial enterprise. The relevance of the study is determined by the fact that modern ERP, MES, APS and BI systems make it possible to promptly detect deviations in planned indicators; however, by themselves they do not provide a formally defined transition from a detected violation to the selection of a justified managerial response. As a result, a gap remains between the information-analytical loop and the decision-making loop, reducing the reproducibility and explainability of managerial actions. The purpose of the study is to develop formal models and algorithms that ensure the transformation of a deviation event into a management case, followed by assessment of its significance, diagnosis of its cause, risk calculation, selection of an admissible response option, routing and protocolling of the result. A management case model is proposed, including a deviation event, an observed state, absolute and normalized KPI deviations, a significance class, a diagnosed cause, a risk assessment, a set of admissible response options, a selected action, a processing route, an expert outcome and a decision protocol. The paper formalizes case-processing statuses, admissible transitions between them, rules for deviation assessment, a mechanism for selecting the preferred option and conditions for transferring a case to expert validation. The practical feasibility of the proposed approach is demonstrated at the level of a research software prototype comprising a computational-algorithmic layer, a layer for storing states and protocols, and an expert validation layer. The obtained results can be used as a methodological basis for developing intelligent modules to support intrafirm planning, ensuring traceability, reproducibility and formalized support of managerial decisions.

**Key words:** Intrafirm planning; intelligent control loop; management case; deviation event; KPI; risk assessment; expert validation; decision protocolling; industrial enterprise.

**Language:** Russian.

The editors received the article on 8 May 2026.