

Интеллектуальная архитектура контура внутрифирменного планирования промышленного предприятия: системный анализ и формализация задачи

С. С. Адышкин • Е. В. Пальчевский

МИРЭА — Российский технологический университет

В работе выполнены системный анализ и формальная постановка задачи построения интеллектуальной архитектуры управления промышленным предприятием в контуре внутрифирменного планирования. Контур планирования предложено интерпретировать как замкнутую управленческую петлю «цель → план → факт → причина → коррекция», в рамках которой интеллектуальная архитектура рассматривается не как описательная модель ИТ-ландшафта, а как нормативно заданный механизм воспроизводимого принятия управленческих решений. Введены и уточнены определения ключевых понятий, а также проведено разграничение корпоративной и цифровой архитектур предприятия по отношению к интеллектуальной архитектуре управления. Сформирована дискретно-временная модель объекта управления, учитывающая частичную наблюдаемость состояния, шумы и задержки измерений, внешние и внутренние возмущения, а также ресурсные, технологические и регламентные ограничения. Показано, что управление по KPI целесообразно формализовать в многокритериальной постановке через функцию потерь и/или риск-ограниченные критерии, допускающие стохастические и робастные трактовки неопределенности. Сформулированы требования к наблюдаемости данных и моделей, а также формализованы принципы прослеживаемости и воспроизводимости управленческого решения посредством фиксации состава используемых данных, версий моделей, параметров, ограничений и множества рассмотренных альтернатив. Полученные результаты образуют методологическую основу для последующей алгоритмизации (мониторинг KPI, причинно-следственная диагностика, прогнозирование, риск-ограниченный выбор воздействий) и верификации интеллектуальной архитектуры управления в сценарно-имитационных экспериментах

Интеллектуальная архитектура управления; замкнутый контур управления; внутрифирменное планирование; управление по KPI; многокритериальная оптимизация; риск-ограниченное управление; воспроизводимость и прослеживаемость решений.

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуализация управления промышленными предприятиями в последние годы смещается от локального внедрения аналитических модулей и моделей машинного обучения к построению замкнутых контуров, в которых планирование, мониторинг исполнения, выявление отклонений и корректирующие воздействия образуют единую управленческую петлю [Bay26]. Практика показывает, что наличие цифровых платформ (ERP/MES/APS, BI, EPM) и развитого инструментального стека анализа данных само по себе не гарантирует повышения управляемости: управленческие решения нередко принимаются при неполной наблюдаемости состояния, при конфликтующих показателях эффективности, с нарушением требований к воспроизводимости и с ограниченной возможностью ретроспективного объяснения причин выбора альтернатив [Rod25, Joh25]. В результате внутрифирменное планирование деградирует до набора разрозненных процедур план-факт анализа и ручных согласований, а не выступает как устойчивый контур управления, способный адаптироваться к возмущениям внешней и внутренней среды [Amr25, Lin25, Сле24].

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. EDN: 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. EDN: CPWXAA (In Russian).

С научной точки зрения обозначенная проблема проявляется как противоречие между, с одной стороны, ростом доступности данных и вычислительных методов для поддержки управленческих решений и, с другой стороны, отсутствием формализованной архитектуры управления, которая бы связывала данные, показатели эффективности и алгоритмы принятия решений в единый контур с заданными свойствами [Пон23, Бол25]. В существующих подходах акцент часто делается либо на архитектурной стороне цифрового предприятия (модели слоев, интеграция приложений, governance), либо на алгоритмической стороне (предиктивные модели, оптимизация, обнаружение аномалий) [Сах23, Кож24, Зей20]. Однако без системной постановки задачи и формальной фиксации критериев, ограничений и неопределенностей такие решения плохо переносимы между предприятиями, слабо сопоставимы по качеству и уязвимы к эффектам дрейфа данных, задержкам измерений, организационным ограничениям и человеческому фактору в контуре управления [Риз23, Зак23, Кон24, Кон24б].

Целью настоящей работы являются системный анализ объекта управления и формальная постановка задачи построения интеллектуальной архитектуры управления промышленным предприятием в контуре внутрифирменного планирования. В рамках поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Уточняется объектно-функциональная структура контура внутрифирменного планирования как замкнутой управленческой петли «план–исполнение–измерение–анализ–корректировка».

2. Формулируется формальная постановка задачи управления по показателям эффективности в условиях многокритериальности и неопределенности.

3. Задаются требования к информации и данным, необходимым для наблюдаемости, управляемости и воспроизводимости решений.

4. Проверяется эффективность предложенного решения на теоретическом примере.

Научная новизна исследования заключается в том, что интеллектуальная архитектура управления трактуется не как совокупность разрозненных цифровых платформ и аналитических инструментов, а как формализованный замкнутый контур управления, описываемый в терминах дискретного времени и включающий модель состояния и наблюдений, управляющие воздействия, возмущения, а также критерии эффективности и систему ограничений. В рамках данной трактовки формально вводятся множества состояний и наблюдений, управляющие воздействия и возмущающие факторы, процедура многокритериальной оценки по КРІ и соответствующие ограничения, а также требования к прослеживаемости и воспроизводимости управленческого решения за счет протоколирования ключевых данных, моделей и параметров принятия решений.

Практическая значимость результатов определяется тем, что предложенная постановка может быть использована как методологическая основа для проектирования и сопоставления алгоритмических модулей мониторинга КРІ, диагностики причин отклонений и риск-ориентированного выбора корректирующих воздействий в задачах внутрифирменного планирования промышленного предприятия, обеспечивая единообразие критериев сравнения и воспроизводимость результатов.

ОБЪЕКТНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КОНТУРА ВНУТРИФИРМЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Методологическая основа исследования включает системный анализ сложных организационно-технических систем, принципы управления по отклонениям и методы формальной постановки задач управления при многокритериальности и неопределенности. В соответствии с поставленными в работе задачами промышленное предприятие рассматривается как иерархическая организационно-техническая система, для которой интеллектуальная архитектура управления трактуется не как совокупность цифровых компонентов и аналитических инструментов, а как формализованный контур управления с явным заданием наблюдений, управляющих воздействий и возмущений, критериев эффективности и ресурсно-технологических

ограничений, а также требований к прослеживаемости и воспроизводимости управленческого решения. Контур внутрифирменного планирования при таком подходе интерпретируется как замкнутая управленческая петля «план–исполнение–измерение–анализ–корректировка», обеспечивающая согласование целей и ресурсов, формирование планов, наблюдение исполнения, выявление отклонений, анализ причин и формирование корректирующих воздействий. Управляемые подсистемы (производство, снабжение, логистика, техническое обслуживание, качество, финансы) связаны материальными, информационными и организационными потоками, а целевые установки фиксируются через систему показателей эффективности.

Системный анализ проводится в следующей последовательности:

1. Задаются границы объекта управления и выделяется класс управленческих задач, относящихся к внутрифирменному планированию: выбор производственных программ, распределение мощностей, календарно-плановые решения, управление запасами и поставками, формирование бюджета затрат, согласование сроков и объемов выполнения.

2. Определяется структура контура управления, включающая входы (портфель заказов/производственная программа, прогноз спроса и сценарные предпосылки, ресурсы и мощности, фактические данные исполнения), нормативно-управляющие воздействия (цели и KPI, регламенты и политики S&OP/IBP, технологические/ресурсные/временные ограничения и политика риска), механизмы реализации (ERP/MES/APS/BI, семантический слой, модели диагностики/прогноза/оптимизации при участии ЛПР) и выходы (согласованный план на горизонте *H*, корректирующие решения, протокол прослеживаемости и отчеты «план–факт» с предупреждениями о рисках), как показано на рис. 1.

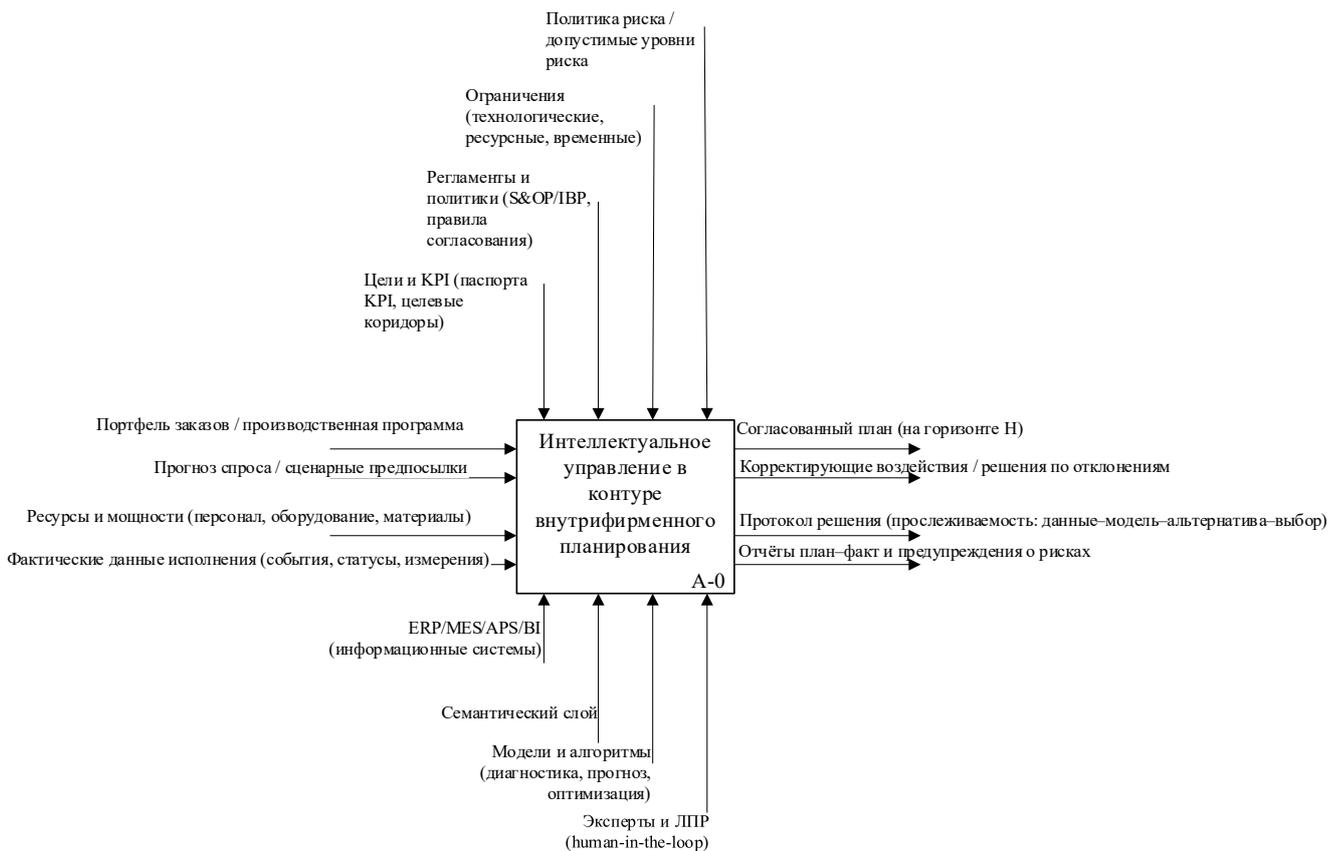


Рис. 1 Контекстная диаграмма интеллектуального управления в контуре внутрифирменного планирования

В дальнейшем контур уточняется на уровне функциональной декомпозиции (рис. 2), что позволяет перейти к последовательному описанию этапов А1–А7 и их информационно-управляющих связей.

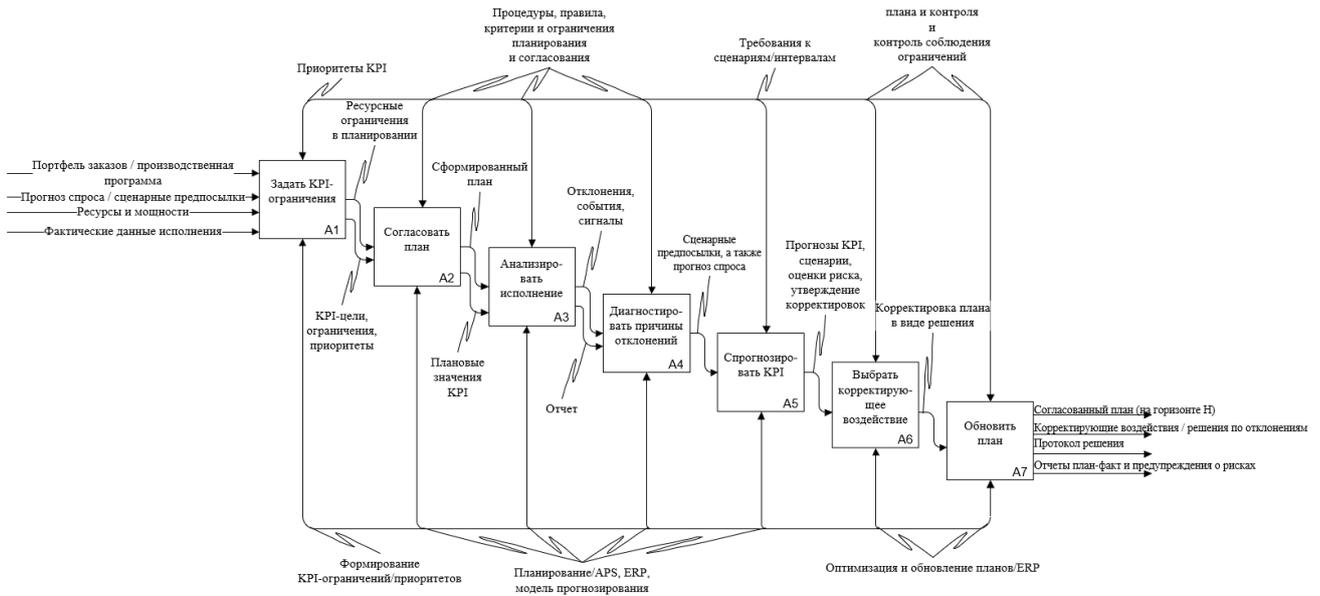


Рис. 2 Декомпозиция контура интеллектуального управления

Далее введем обозначения: t – дискретный момент времени; Δt – шаг дискретизации; H – горизонт планирования; $x_t \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния; $y_t \in \mathbb{R}^q$ – вектор наблюдений; ε_t – шум/ошибка измерений; $u_t \in \mathbb{R}^m$ – управляющее воздействие; U_t – план на горизонте H (последовательность управляющих воздействий); $d_t \in \mathbb{R}^r$ – вектор возмущений; $f(\cdot)$, $h(\cdot)$ – модели динамики и измерений; $z_t \in \mathbb{R}^p$ – вектор KPI; $g(\cdot)$ – модель расчета KPI; z^-, z^+ – нижняя и верхняя границы KPI; z^{ref} – целевые значения KPI; w – вектор (или набор) приоритетов KPI; $c(x, u)$ – вектор ограничений; $[\cdot]_+$ – покомпонентно $\max(\cdot, 0)$; $\ell(\cdot, \cdot)$ – функция потерь; $\omega \in \Omega$ – сценарий реализации неопределённостей внешней и внутренней среды (траектория возмущений и параметров, влияющих на динамику и KPI) на горизонте H ; Ω – множество допустимых сценариев реализации неопределённостей (множество траекторий σ) на горизонте H , используемое для сценарной оценки KPI и рисков; $\rho_\alpha(\cdot)$ – мера риска уровня α , при этом α обозначает уровень риска (доверия); $\lambda, \gamma \geq 0$ – коэффициенты (веса/штрафы); Δz_t – отклонение KPI «план–факт»; v_t – нарушения ограничений; r – факторы причин (вектор факторов); $\psi(r, \cdot)$ – диагностическая модель причин отклонений KPI (модель идентификации факторов r по данным план–факт и наблюдениям); $\hat{z}_{t+h}^{(t)}$ – прогноз KPI на момент $t + h$ по информации до t ; $q_\beta(\cdot)$ – β -квантиль; β – уровень квантиля; Δu_t – корректировка управления; P_t – протокол (журнал) управленческого цикла, фиксирующий данные наблюдения, рассчитанные KPI, принятые решения, использованные модели и параметры для обеспечения прослеживаемости и воспроизводимости; D_t – зафиксированные данные; M_t – модель, точнее идентификатор (версия) используемой модели/набора моделей принятия решений в момент t (например, модели прогноза KPI, диагностики причин, оптимизационной модели планирования); Θ_t – параметры модели.

На этапе A1 выполняются целеполагание и задание KPI-ограничений: вводятся допустимые интервалы показателей $z_t \in \mathbb{R}^p$ в виде $z^- \leq z_t \leq z^+$, а также приоритеты $w \in \mathbb{R}_+^p$, удовлетворяющие условию нормировки $\sum_{i=1}^p w_i = 1$, с учетом ресурсно-технологических ограничений $c_i(x_t, u_t) \leq 0$, $i = 1, \dots, k$, где k – размерность вектора ограничений. Состояние объекта управления $x_t \in \mathbb{R}^n$ задаёт совокупность ключевых характеристик системы (например, уровни запасов, загрузку производственных мощностей, финансовые показатели и др.) и описывается в дискретном времени моделью динамики $x_{t+1} = f(x_t, u_t, d_t)$, где $u_t \in \mathbb{R}^m$ – управляющее воздействие, $d_t \in \mathbb{R}^r$ – вектор возмущений. При частичной наблюдаемости регистрируются наблюдения $y_t = h(x_t) + \varepsilon_t$ значения KPI вычисляются как $z_t = g(x_t, u_t)$, где $g(\cdot)$ – модель (оператор) расчёта KPI по состоянию и управлению.

Далее на А2 формируется и согласуется план на горизонте $U_t = \{u_t, \dots, u_{t+H-1}\}$, который определяется как решение риск-ограниченной многокритериальной задачи (1):

$$U_t^* = \arg \min_{U_t} [\mathbb{E}_{\omega \in \Omega} \sum_{h=1}^H \ell(z_{t+h}(\omega), z^{ref}) + \lambda \rho_\alpha(\cdot)], \quad (1)$$

при ограничениях $z^- \leq z_{t+h}(\omega) \leq z^+$, $c_i(x_{t+h}, u_{t+h}) \leq 0$, $i = 1, \dots, k$, $h = 1, \dots, H$, $\omega \in \Omega$, где $\omega \in \Omega$ – сценарии, а $\rho_\alpha(\cdot)$ – мера риска уровня α .

На А3 план сопоставляется с фактическим исполнением в рамках мониторинга и план-факт анализа, что формализуется отклонениями $\Delta z_t = z_t^{fact} - z_t^{plan}$ и фиксацией нарушений ограничений $v_{t,i} = \max\{0, c_i(x_t, u_t)\}$, $i = 1, \dots, k$.

Выявленные отклонения, события и сигналы передаются на А4 для диагностики причин, например, через оценку факторов r_i по критерию наименьших квадратов:

$$\hat{r}_t = \arg \min_r \sum_{j=1}^p (\Delta z_{t,j} - \psi_j(r, y_{1:t}, U_t))^2, \quad (2)$$

где $\psi(r, \cdot)$ – диагностическая модель причин отклонений КРІ (модель, связывающая факторы r и доступные наблюдения/плановые данные с вектором отклонений Δz_t).

После этого на этапе А5 выполняется прогноз КРІ и сценарная оценка с учётом рисков и интервальных/сценарных предпосылок. Для каждого сценария $\omega \in \Omega$, задающего траекторию внешних факторов (возмущений) $d_{t:t+h-1}(\omega)$ на горизонте планирования, формируется прогноз КРІ на моменты $t + h$ по информации, доступной в момент t :

$$\hat{z}_{t+h}^{(t)}(\omega) = \hat{z}(x_t, U_t, d_{t:t+h-1}(\omega)), \quad h = 1, \dots, H, \quad \omega \in \Omega. \quad (3)$$

На основе множества сценарных прогнозов $\{z_{t+h}^{(t)}(\omega)\}_{\omega \in \Omega}$ при необходимости строятся интервальные оценки КРІ, например, по квантилям $q_\beta(z)$ и $q_{1-\beta}(z)$, используемым далее для сценарной оценки рисков и выбора корректирующих воздействий.

На этапе А6 осуществляется выбор корректирующих воздействий (в том числе риск-ограниченных) и формируется решение о коррекции:

$$\Delta u_t^* = \arg \min_{\Delta u \in \mathbb{R}^m} \left(\sum_{j=1}^p w_j (\hat{z}_{t+1,j}^{(t)}(\omega) - z_j^{ref})^2 + \gamma \sum_{i=1}^m (\Delta u_i)^2 \right), \quad (4)$$

где m – размерность управляющего воздействия (число компонент u_i), p – число КРІ.

На А7 выполняется обновление плана по принципу «скользящего горизонта» (актуализация U_{t+1}^{plan} и контроль соблюдения ограничений с фиксацией выполненного плана и протоколированием решения:

$$P_t = (D_t, M_t, \Theta_t, \Omega, \alpha, w, z^-, z^+, U_t^*), \quad (5)$$

что обеспечивает воспроизводимость и прослеживаемость управленческого цикла; сверху на схеме (рис. 2) отражены регламенты/требования, снизу – поддерживающие механизмы (APS/ERP-планирование, оптимизация).

Декомпозиция управленческого цикла А1–А7 может быть операционализована в виде процесса IBP/S&OP в нотации BPMN с разделением по функциональным дорожкам (планирование ERP/APS, ИА/аналитика, ЛПП, производство MES, снабжение/логистика, финансы/контролинг), как показано на рис. 3.

Дорожка планирования реализует сбор входов (заказы, прогноз, ограничения) и формирование проекта плана, а затем перепланирование/обновление в рамках U_t при сдвиге горизонта H . Дорожка ИАП/аналитики обеспечивает оценку плана по КРІ и рискам на множестве сценариев $\omega \in \Omega$ и формирует отчет по $\{z_{t+h}(\omega)\}_{h=1}^H$, а также альтернативы для ЛПП. В дорожке ЛПП фиксируется принятие/утверждение плана и корректировки, что определяет выбор U_t^* и Δu_t^* в смысле (1) и (4). Производственный контур (MES) и обеспечивающие подсистемы формируют факт исполнения и наблюдения y_t при наличии шумов ε_t , что замыкает план-факт

сравнение через $\Delta z_t = z_t^{fact} - z_t^{plan}$ и нарушения $v_{t,i} = \max\{0, c_i(x_t, u_t)\}, i = 1, \dots, k$. При существенных отклонениях активируются диагностика причин \hat{f}_t по (2) и прогноз $\hat{z}_{t+h}(w)$ по (3), после чего формируются рекомендации по Δu_t и выполняется их утверждение.

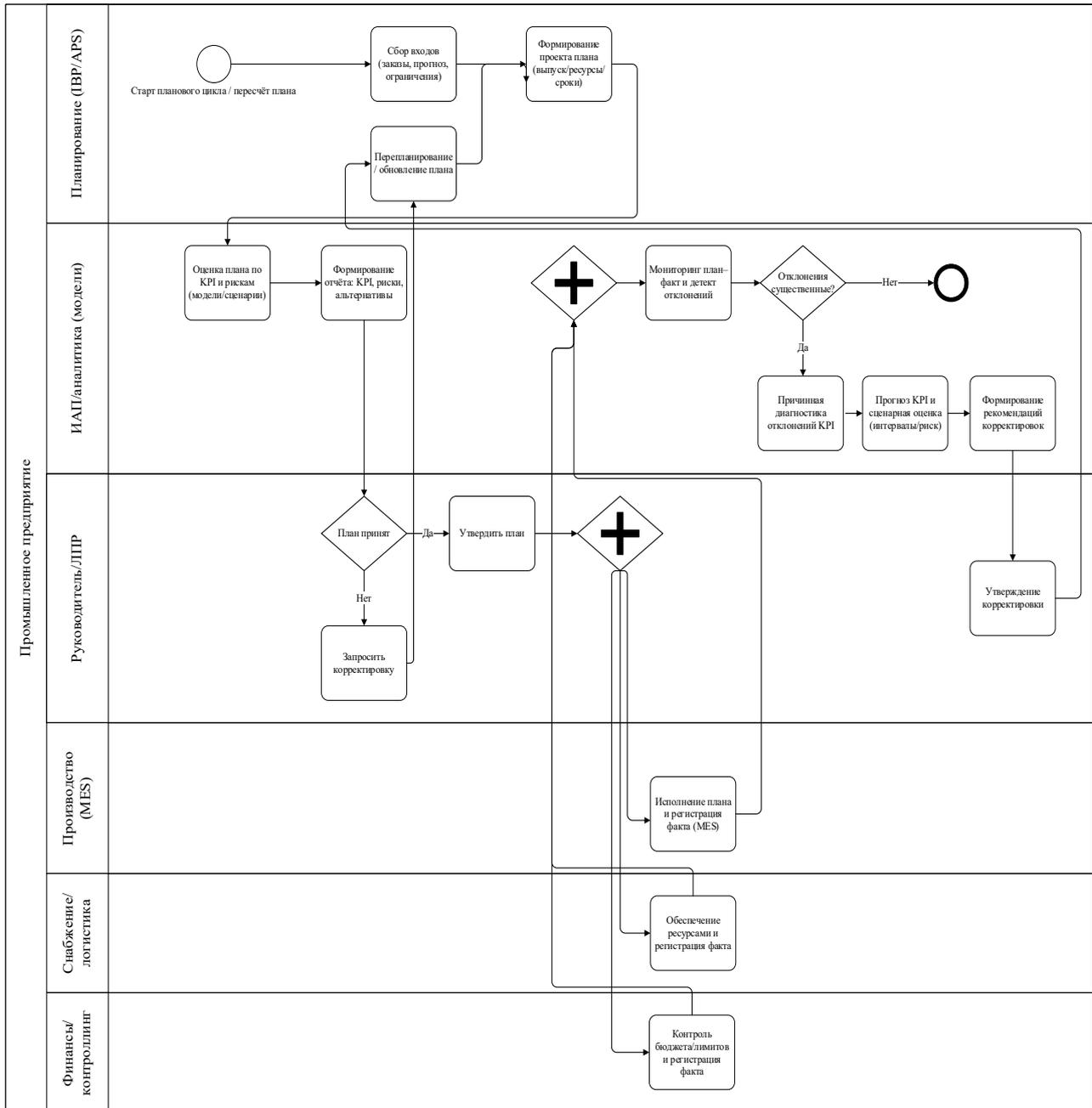


Рис. 3 Ролевая BPMN-декомпозиция этапов А1–А7 интеллектуального контура управления

Принципиально, что на каждом шаге фиксируются данные D_t , модели M_t и параметры θ_t в протоколе P_t , обеспечивая воспроизводимость решения. Подчеркнем, что в данном определении архитектура трактуется не как статическое описание ИТ-ландшафта, а как нормативно заданный механизм управленческого поведения, то есть как переносимая управленческая технология с требованиями устойчивости, повторяемости и объяснимости при ограниченности по риску и ресурсам. Тем самым рис. 3 задает практико-ориентированную «сборку» формул (1)–(5) в единый контур, что позволяет перейти к разделу, в котором формулируется формальная постановка задачи управления по показателям эффективности в условиях многокритериальности и неопределенности.

**ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ЭФФЕКТИВНОСТИ
В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Пусть $t \in N_0$, где $N_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$ – дискретный момент времени, на котором осуществляется управление (планирование) в рамках рассматриваемого контура на горизонте H . Состояние объекта управления описывается в дискретном времени уравнением динамики с учетом возмущений и частичной наблюдаемости. Формально предполагается модель вида:

– динамика: $x_{t+1} = f(x_t, u_t, \xi_t)$, где x_t – вектор состояния модели; u_t – управляющее решение (управляющее воздействие) на шаге t ; ξ_t – вектор внешних или внутренних возмущений, влияющих на динамику;

– наблюдения: $y_t = h(x_t) + \varepsilon_t$, где y_t – вектор наблюдаемых показателей (частично отображающих состояние), а ε_t – шум измерений. Управляющие решения на всем горизонте H образуют план u_0, u_1, \dots, u_{H-1} , который необходимо оптимизировать.

Каждый план оценивается по вектору показателей эффективности КРІ (ключевых показателей эффективности) – допустим, $KPI_t = g(x_t)$ – рассчитываемому через функцию $g(\cdot)$ от состояния (или других переменных процесса). Для каждого показателя i задаются целевые значения KPI_i^* и допустимые интервалы значений КРІ в виде ограничений $L_i \leq KPI_i \leq U_i$, отражающие нижние и верхние допустимые границы. Многокритериальность задачи обусловлена тем, что вектор КРІ может содержать несколько компонент (например, финансовые, производственные, качественные показатели), важность которых задается вектором приоритетов $w = (w_1, \dots, w_m)$. Приоритеты нормированы (например, $\sum_i w_i = 1$) и отражают относительную значимость соответствующих КРІ в интегральном критерии.

С учетом указанной модели и показателей планирование на горизонте H формализуется как задача оптимального управления по КРІ в условиях неопределенности. Неопределенность учитывается множеством сценариев Ω (например, сценарии развития спроса, доступности ресурсов и пр.), а также случайными возмущениями ξ_t и шумами ε_t . Для каждого сценария $\sigma \in \Omega$ можно просимулировать траекторию системы (x_0, \dots, x_H) при выбранном плане и вычислить соответствующие значения КРІ. Для агрегирования многокритериального результата вводится функция потерь $L(\cdot)$, которая отображает вектор КРІ в скалярную величину с учетом приоритетов w и, возможно, отклонения от целевых значений КРІ. Например, $L(KPI(x_H))$ может быть определена как взвешенная сумма штрафов за отклонение компонент КРІ от их целевых значений KPI_i^* .

Кроме того, чтобы учесть риски и разброс результатов по сценариям, применяется мера риска $\rho_\alpha(\cdot)$ уровня доверия α . В общем случае ρ_α представляет собой функционал, сопоставляющий случайной величине (например, величине потерь) ее риск-метрику на уровне α (частный случай – математическое ожидание при $\alpha = 1$, квантиль или CVaR (Conditional Value at Risk) при $0 < \alpha < 1$, супремум при $\alpha \rightarrow 0$ для робастного подхода).

Таким образом, задача риск-ограниченного многокритериального планирования на горизонте H может быть сформулирована как оптимизационная проблема

$$u_{0:H-1}^* = \arg \min_{\{u_0, \dots, u_{H-1}\}} \rho_\alpha \left(\mathcal{L}(KPI(x_H)) \right), \quad (6)$$

при ограничениях для каждого сценария $\sigma \in \Omega$ и каждого шага t :

– динамические уравнения модели: $x_{t+1} = f(x_t, u_t, \xi_t^{(\sigma)})$ с заданным начальным состоянием x_0 ;

– ограниченная наблюдаемость: $y_t = h(x_t) + \varepsilon_t^{(\sigma)}$;

– допустимые интервалы значений КРІ: $L_i \leq KPI_i(x_H^{(\sigma)}) \leq U_i, \quad i = 1, \dots, m$;

– ресурсно-технологические ограничения: $c_i(x_t, u_t) \leq 0, \quad i = 1, \dots, k$ (например, ограничения по мощностям, ресурсам, бюджету и т. п.).

Здесь $x_H^{(\sigma)}$ обозначает состояние (и, соответственно, $KPI(x_H^{(\sigma)})$ – значения КРІ) к концу горизонта H при реализации сценария σ и использовании плана u_t . Решение $u_{0:H-1}^*$ оптимизирует выбранный критерий $\rho_\alpha(L(\cdot))$, минимизируя риск-ориентированную функцию потерь с учетом приоритетов КРІ и заданного уровня риска α . При $\alpha \rightarrow 1$ критерий вырождается в многокритериальную задачу по средним показателям, а при малых α стремится к робастному обеспечению КРІ в худших сценариях. Важным элементом постановки (6) является то, что наряду с оптимизацией целевых показателей учитываются ограничения: план не должен нарушать допустимые диапазоны КРІ и ограничения $c(x, u)$ по всем существенным сценариям, что гарантирует устойчивость решения.

Замкнутый контур управления. Решение оптимизационной задачи (6) на этапе планирования (этап А2 контура) порождает оптимальный план $u_{0:H-1}^*$, согласованный с целями по КРІ. Однако из-за неопределенности реализация плана может отклоняться от ожиданий. Поэтому управление осуществляется в замкнутом контуре, включающем мониторинг, диагностику и корректировку плана по результатам его исполнения. Формально это выражается через последовательность моделей (7)–(10), каждая из которых играет свою роль в общей задаче управления:

– на этапе мониторинга фактическое исполнение плана сравнивается с плановыми значениями КРІ. Вычисляются отклонения $\Delta KPI_t = KPI_t^{\text{fact}} - KPI_t^{\text{plan}}$ и фиксируются нарушения ограничений (если $\exists i \in \{1, \dots, k\}: c_i(x_t, u_t) > 0$ для некоторых t). Эти величины формализуют результаты этапа контроля «план–факт» (А3) и служат входными данными для диагностики;

– на этапе А4 (диагностика причин) выявленные отклонения и сигналы анализируются, например, посредством оценивания скрытых факторов r (причин отклонений) с помощью диагностической модели. Математически это можно представить, например, в виде зависимости

$$r = D(\Delta KPI_t, x_t, u_t), \quad (7)$$

где $D(\cdot)$ – диагностическая модель, устанавливающая связь между наблюдаемыми отклонениями и возможными причинами (факторами r). Решение (7) позволяет количественно оценить, какие именно внутренние или внешние факторы стали ключевыми причинами отступления от плана (например, недостаток ресурса, изменение спроса, сбой процесса и т. д.);

– этап А5 (прогнозирование) предназначен для упреждающей оценки развития ситуации. На основе обновленного состояния системы и результатов диагностики выполняется прогноз значений КРІ на некоторый шаг вперед $t + h$ с учетом актуальной информации и сценарных предпосылок. Формально прогнозирование можно описать моделью

$$\hat{y}_{t+h} = F(x_t, \sigma), \quad (8)$$

где $F(\cdot)$ – прогнозная модель, вычисляющая ожидаемые значения КРІ (или связанных показателей) на горизонте h вперед при текущем состоянии x_t и при условии сценария σ . Помимо точечного прогноза, на этом же этапе может проводиться оценка доверительных интервалов или квантильных характеристик прогнозируемых КРІ (например, вычисление β -квантилей для некоторых β , чтобы оценить диапазон возможных отклонений). Таким образом, модель (8) дает представление о том, к чему приведет текущее управление при продолжении трендов или при наступлении тех или иных сценарных условий;

– этап А6 (выбор корректирующих воздействий) решает задачу адаптивного управления: на основе диагноза и прогноза определяется корректировка плана Δu_t . Корректирующее решение также может быть получено из оптимизационной подзадачи, аналогичной (6), но на укороченном горизонте и с учетом новых данных

$$\Delta u_t^* = \arg \min_{\Delta u_t} L(KPI(x_{t+h})), \quad (9)$$

где при рискованных ограничениях в критерий и ограничения включены дополнительные штрафы за отклонения, а также учитываются риск-метрики по аналогии с задачей (6). Здесь (9) символически отражает выбор оптимального корректирующего воздействия (или набора воздействий) Δu_t^* , минимизирующего потери в оставшийся период с учетом допустимого уровня риска и актуальных ограничений;

– на этапе А7 (обновление плана) реализуется принцип скользящего горизонта: скорректированный план интегрируется в общий график выполнения. Формально новый план можно обозначить как $u_{0:H-1} \leftarrow \text{Update}(u_{0:H-1}, \Delta u_t^*)$, где функция Update обновляет исходную последовательность решений с учетом принятой корректировки. Результаты исполнения фиксируются: завершённые шаги плана, принятые решения о коррекции и все сопутствующие данные протоколируются для последующего анализа. В математическом виде это отражается следующим образом:

$$P = P \cup \{x_t, y_t, u_t, \Delta u_t^*, \text{KPI}(x_t), \text{модели, параметры}\}, \quad (10)$$

где P – формализованный протокол (журнал) управления. Добавление в P набора данных на каждом шаге означает фиксацию состояния, наблюдений, действий, использованных моделей, их параметров и полученных альтернатив. Такое протоколирование гарантирует воспроизводимость и прослеживаемость управленческих решений: любой шаг цикла может быть проанализирован ретроспективно, а принятые решения могут быть воспроизведены при тех же исходных условиях.

Таким образом, формальная задача управления по показателям эффективности в условиях многокритериальности и неопределенности включает не только решение оптимизационной задачи (6) на этапе планирования, но и замкнутый итеративный процесс (формулы (7)–(10)), обеспечивающий адаптацию плана к изменяющимся условиям и корректировку отклонений. В совокупности:

– **многокритериальность** учитывается через вектор КРІ с весами w и функцию потерь $L(\cdot)$, позволяющую агрегировать несколько целей;

– **неопределенность** учитывается через сценарный подход ($\sigma \in \Omega$) и меры риска ρ_α , а также через явное представление случайных возмущений ξ_t и ошибок измерений ε_t в модели;

– **ограничения** ($c(x_t, u_t)$, допуски по КРІ и др.) вводятся явным образом в постановку, что ограничивает множество допустимых решений и повышает надежность плана;

– **прослеживаемость и воспроизводимость** решений гарантируются введением протокола P и фиксацией на каждом шаге всех данных, моделей и параметров, повлиявших на решение.

Представленная формализация задает замкнутый контур интеллектуального управления: начиная от постановки целей и планирования по КРІ (оптимизация (6)), через мониторинг, диагностику и прогнозирование (7)–(10), к выбору оптимальных корректирующих действий (задача типа (9)) с последующим обновлением плана (10) и сохранением всей истории. Такая постановка позволяет строго определить требования к данным и моделям, а также служит основой для разработки алгоритмов мониторинга, диагностики и принятия решений с учетом риска в задачах внутрифирменного планирования промышленного предприятия.

ТРЕБОВАНИЯ К ИНФОРМАЦИИ И ДАННЫМ, НЕОБХОДИМЫМ ДЛЯ НАБЛЮДАЕМОСТИ, УПРАВЛЯЕМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ РЕШЕНИЙ

Предложенная многокритериальная риск-ограниченная постановка управления по КРІ в замкнутом контуре А1–А7 задает не только структуру целевой функции и ограничений, но и минимально необходимый состав информации, без которого невозможно обеспечить корректность мониторинга, устойчивость корректирующих воздействий и воспроизводимость результата. В силу частичной наблюдаемости состояния x_t и наличия возмущений/шумов

измерений информационное обеспечение контура должно быть специфицировано как система требований, обеспечивающих наблюдаемость, управляемость и воспроизводимость управленческих решений.

Требования для наблюдаемости. Наблюдаемость в контуре управления означает, что по доступным измерениям можно получить информационно достаточное представление о текущем состоянии объекта и его динамике для вычисления КРІ и выявления отклонений «план–факт». Формально это соответствует наличию наблюдений вида

$$y_t = h(x_t, v_t), \quad (11)$$

где y_t – вектор наблюдений; $h(\cdot)$ – модель измерений; v_t – шум/ошибка измерений. Из данного соотношения следует, что должны быть обеспечены систематический сбор наблюдений y_t с требуемой частотой (шагом дискретизации) и контролируемые характеристики ошибок v_t (в части допустимых диапазонов, пропусков, задержек, дрейфа). При этом в состав наблюдаемых данных необходимо включать:

- производственные данные исполнения (фактические значения ключевых параметров выполнения плана), позволяющие вычислять фактические КРІ K_t и формировать отклонения ΔK_t ;
- данные спроса и внешних воздействий, отражающие сценарные изменения внешней среды и возмущения, влияющие на реализацию плана;
- события и сигналы (инциденты, отклонения технологических режимов, нарушения регламентов), формирующие основания для диагностики причин и уточнения сценарных предпосылок;
- значения фактических КРІ K_t и производные показатели мониторинга качества моделей (в частности, ошибки прогнозов КРІ, сопоставляющие \hat{K}_{t+h} и последующие фактические значения).

Тем самым наблюдаемость трактуется не только как наличие «сырых» измерений, но и как наличие устойчивого канала вычисления производных управленческих признаков, необходимых для мониторинга и последующего принятия решений.

Требования для управляемости. Управляемость означает возможность формировать управляющие воздействия u_t (план и корректировки) таким образом, чтобы система достигала целевых КРІ и одновременно соблюдала ресурсно-технологические ограничения. Введенная в постановку система ограничений должна быть информационно обеспечена актуальными данными, поскольку управление строится при выполнении условий вида

$$c_i(x_t, u_t) \leq 0, \quad i = 1, \dots, k, \quad (12)$$

а также при соблюдении допустимых интервалов значений КРІ

$$K^- \leq K_t \leq K^+, \quad (13)$$

где $c(\cdot)$ – вектор ресурсных/технологических/регламентных ограничений; K^-, K^+ – нижняя и верхняя границы допустимых значений КРІ.

Следовательно, для управляемости требуется:

1. **Актуальность ограничений.** Значения параметров, входящих в $c(x_t, u_t)$ (мощности, ресурсы, лимиты, регламенты), должны быть согласованы по времени с текущим шагом t и плановым горизонтом H .
2. **Определенность приоритетов.** Вектор приоритетов w должен быть явно задан (и нормирован) как часть целеполагания, поскольку он определяет агрегирование многокритериального результата в функции потерь $L(\cdot)$.
3. **Сценарное описание неопределенности.** Множество сценариев $\zeta \in \Omega$ должно быть параметризовано данными, достаточными для расчета альтернатив и оценки рисков, поскольку оптимизация и выбор корректировки выполняются в риск-ориентированной постановке с использованием меры риска $\rho_\alpha(\cdot)$ уровня α .

4. *Информационная связность* этапов А1–А7. Результаты мониторинга (отклонения ΔK_t , нарушения ограничений) должны поступать в блоки диагностики/прогноза и далее – в блок выбора корректирующих воздействий, обеспечивая замыкание контура и возможность пересчета управления при изменении входных условий.

Таким образом, управляемость обеспечивается не только наличием формальной модели оптимизации, но и полнотой данных, позволяющих корректно вычислять ограничения, критерий и риск на каждом шаге цикла.

Требования для воспроизводимости и прослеживаемости. Воспроизводимость означает возможность повторить управленческое решение при фиксированных исходных условиях и однозначно восстановить ход рассуждений, после которого была выбрана данная альтернатива. Для этого вводится протокол (журнал) управления Π , в который на каждом шаге должны сохраняться данные, решения и контекст применения моделей. В терминах протоколирования фиксируемая структура может быть представлена как накопление записей:

$$\Pi \leftarrow \Pi \cup \{D_t, P, \Delta u_t, M, \theta, \Omega, w, \rho_\alpha, L(\cdot)\}, \quad (14)$$

где $D_t = \{x_t, y_t, K_t, \Delta K_t\}$ – зафиксированное минимально необходимое информационное ядро шага управления t ; P – план на горизонте H ; Δu_t – корректирующее воздействие; M – используемые модели; θ – их параметры. Принципиально, что в протоколе сохраняются не только «вход–выход» управленческого шага, но и множество рассмотренных альтернатив, принятые сценарные предпосылки Ω , используемые версии моделей M и параметры θ . Это обеспечивает прослеживаемость выбора (почему был выбран именно данный план/коррекция) и воспроизводимость (возможность повторить расчет при тех же данных и моделях).

Сводная интерпретация указанных требований и их привязка к этапам А1–А7 представлена на рис. 4, где показано, каким образом наблюдаемость, управляемость и протоколирование «собирают» замкнутый цикл принятия решений.

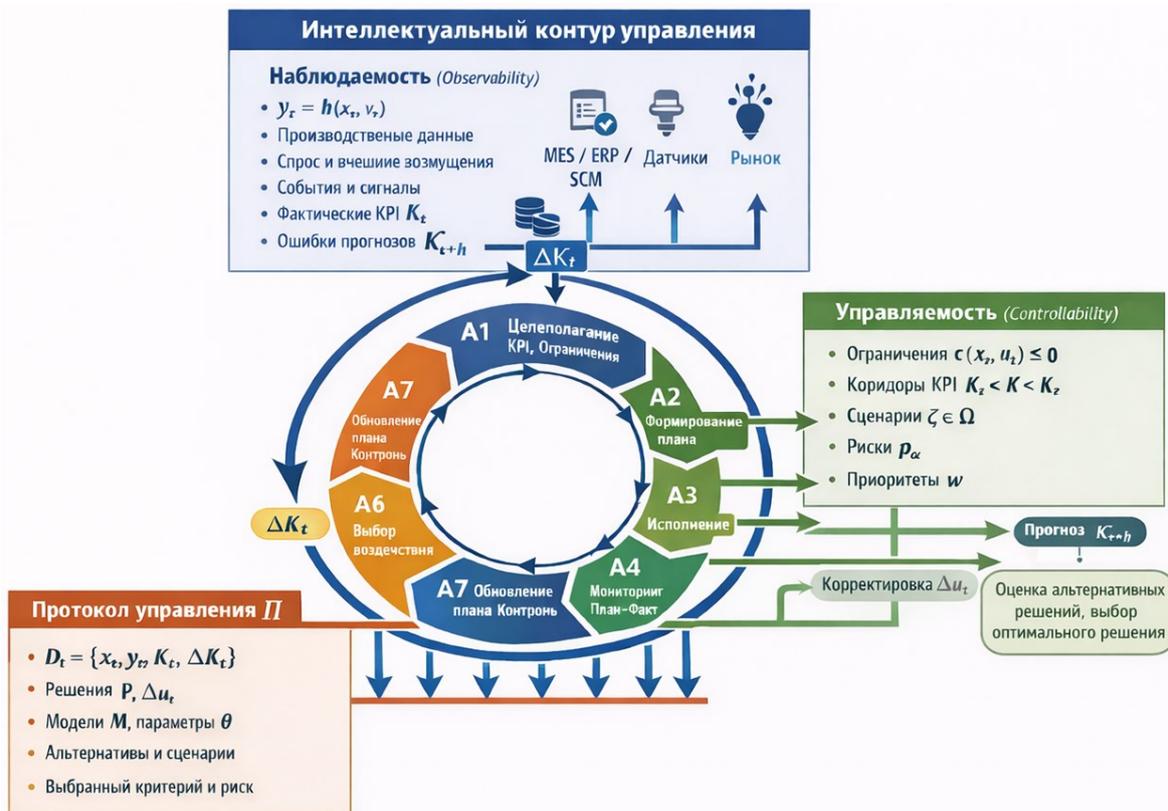


Рис. 4 Концептуальная архитектурная схема интеллектуального контура управления, связывающая этапы А1–А7 с условиями наблюдаемости, управляемости и протоколирования

В верхнем блоке «Наблюдаемость» фиксируется модель измерений $y_t = h(x_t, v_t)$ и перечисляется состав данных, необходимых для вычисления фактических КРІ K_t и отклонений ΔK_t , включая производственные данные исполнения, спрос/внешние возмущения и события/сигналы. В правом блоке «Управляемость» показано, что формирование плана и корректировок основывается на ограничениях $c_i(x_t, u_t) \leq 0$, $i = 1, \dots, k$, допустимых интервалов КРІ $K^- < K_t < K^+$, сценариях $\zeta \in \Omega$, рисках ρ_α и приоритетах w , что соответствует риск-ограниченной многокритериальной оптимизации и последующему выбору воздействий. В нижнем блоке «Протокол управления Π » задается состав фиксируемых сущностей: данные $D_t = \{x_t, y_t, K_t, \Delta K_t\}$, решения P и Δu_t , используемые модели M и параметры θ , а также альтернативы и сценарии, обеспечивающие воспроизводимость и прослеживаемость управленческого цикла.

Преимущества предлагаемой архитектуры. Представленная архитектурная схема, в явном виде связывающая наблюдаемость, управляемость и протоколирование с этапами А1–А7, обладает рядом принципиальных преимуществ по отношению к разрозненным (непетлевым) реализациям планирования и аналитики.

Во-первых, архитектура обеспечивает сквозную интеграцию данных и моделей в рамках единого замкнутого цикла: наблюдения y_t и события исполнения формируют основу для расчета фактических КРІ K_t и отклонений ΔK_t , которые далее служат входами для диагностики, прогнозирования и формирования корректирующих воздействий. Такая связность устраняет разрыв между планированием и фактом исполнения и позволяет рассматривать управление как нормативно заданный механизм, а не как набор несогласованных процедур.

Во-вторых, постановка управления в терминах многокритериального риск-ограниченного выбора обеспечивает устойчивость решений к неопределенности: сценарное описание $\zeta \in \Omega$ и использование меры риска ρ_α позволяют встраивать риск в критерий принятия решения, а ограничения $c_i(x_t, u_t) \leq 0$, $i = 1, \dots, k$ и интервалы значений $K^- \leq K_t \leq K^+$ – явно задавать область допустимых управленческих воздействий.

В-третьих, архитектура формирует технологическую основу для воспроизводимости и прослеживаемости решений за счет протокола Π : фиксируются данные D_t , выбранные решения P и Δu_t , версии моделей M и параметры θ , а также альтернативы и сценарные предпосылки. Это позволяет ретроспективно восстановить контекст и ход принятия решения и при необходимости воспроизвести расчет при тех же условиях, что повышает доверие к системе и делает результаты сопоставимыми во времени и между подразделениями.

Наконец, стандартизованная декомпозиция А1–А7 и принцип «скользящего горизонта» обеспечивают повторяемость управленческого цикла: управление превращается в устойчивый процесс с формализованными входами/выходами, что создает основу для последующей алгоритмизации и верификации (мониторинг КРІ, причинная диагностика, прогнозирование, риск-ориентированный выбор воздействий) в рамках единой интеллектуальной архитектуры управления.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

В данном разделе проводится количественная оценка эффективности предлагаемой архитектуры. Цель анализа – аргументированно продемонстрировать, что новая схема управления при прогнозной диагностике и риск-ориентированной корректировке обеспечивает лучшие результаты по ключевым показателям (КРІ) по сравнению с классическим «план–факт» подходом. В частности, рассматриваются такие свойства, как устойчивость принятых решений к неопределенности входных параметров w , точность достижения целевых КРІ, сокращение разрывов «план–факт», уменьшение числа нарушений ограничений $c(x, u)$, а также воспроизводимость решений через протокол Π . Заметим, что значение КРІ может быть задано численно лишь «при условии, что эта неопределенность тоже может быть количественно оценена». Предлагаемая архитектура учитывает этот принцип: при расчете КРІ и корректировке планов

она явно моделирует и ограничивает влияние неопределенности, что повышает надежность принимаемых решений и доверие к ним.

Критерии эффективности. Основными критериями эффективности предлагаемого подхода являются следующие характеристики:

1. **Устойчивость решений к неопределенности.** Предложенная схема учитывает вероятность возникновения неблагоприятных сценариев (через метрику риска ρ_α) и таким образом расширяет множество допустимых стратегий управления. Это снижает чрезмерную консервативность классических методов и обеспечивает сохранение требуемых ограничений при вариациях w . В результате оптимальные решения демонстрируют минимальное изменение при разумных колебаниях исходных данных.

2. **Точность достижения целевых КРІ.** Путем прогноза будущих состояний системы и алгоритмической корректировки управления предлагаемый подход обеспечивает близкое соответствие значений КРІ их целевым уровням. Это означает, что средние отклонения КРІ от заданных целей минимальны, а заданные уровни производительности достигаются более стабильно.

3. **Снижение «план–факт» отклонений.** Использование прогнозной диагностики и своевременная коррекция планов позволяют существенно уменьшить расхождения между плановыми и фактическими показателями. В частности, средняя величина разницы между запланированными и достигнутыми КРІ значительно меньше по сравнению с реактивным (классическим) подходом.

4. **Снижение числа нарушений ограничений $c_i(x_t, u_t)$.** Благодаря учету рисков и заблаговременной подстройке параметров управления вероятность нарушения ограничений (условий безопасности, производственных норм и т.д.) низка. Это эквивалентно уменьшению доли ситуаций, когда $\exists i \in \{1, \dots, k\}: c_i(x_t, u_t) > 0$. Как отмечено в теоретической модели, допустимый риск ρ_α контролирует частоту потенциальных нарушений, обеспечивая баланс между жесткостью ограничений и эффективностью решения.

5. **Воспроизводимость решений через протокол Π .** Применение единого алгоритма принятия решений с жестким протоколированием каждого шага обеспечивает полную повторяемость (репликацию) результатов. Даже при наличии источника случайности или неопределенности, фиксированный протокол Π гарантирует, что идентичные входные данные w приведут к тем же управленческим решениям u . Это повышает доверие к системе и облегчает аудит и анализ результатов.

Каждый из перечисленных критериев может быть формализован соответствующей метрикой (см. ниже): разброс КРІ, доля нарушений, средняя функция потерь $L(\cdot)$, уровень риска ρ_α и т.д. Сочетание этих метрик отражает общее преимущество предлагаемого подхода.

Сравнительный анализ. Для демонстрации эффективности рассмотрим сравнительный анализ с классическим «план–факт» подходом, в котором нет прогнозной диагностики и риск-ограниченной корректировки. Классический метод ретроспективен и реагирует на отклонения лишь постфактум, что приводит к большим несоответствиям плановых и фактических показателей и нередко к частым нарушениям ограничений при непредвиденных изменениях. В отличие от него предлагаемая архитектура опирается на предиктивные модели и контролирует уровень риска ρ_α , снижая вероятность выхода системы за допустимые пределы.

Далее в таблице приведен условный сравнительный пример: рассчитаны ключевые метрики эффективности для обоих подходов. Значения в таблице демонстрируют, что предложенный метод существенно превосходит классический по всем показателям.

Из таблицы видно, что для предлагаемой архитектуры среднее отклонение КРІ от целевых значений существенно меньше, чем у классического решения. Процент сценариев с нарушениями ограничений и усредненное значение функции потерь $L(\cdot)$ тоже значительно ниже.

Таблица

Сравнение ключевых показателей предлагаемого и классического подходов

№ п/п	Показатель	Предложенный подход	Классический подход
1	Среднее отклонение КРІ от цели, %	5	20
2	Доля сценариев с нарушениями, %	10	40
3	Среднее значение функции потерь $L(\cdot)$	0.15	0.40
4	Уровень риска ρ_α , %	10	30
5	Доля воспроизводимых решений, %	95	50

Уровень риска ρ_α , заданный при оптимизации, в предлагаемом методе поддерживается на минимально необходимом уровне, тогда как в классическом случае он значительно выше, что указывает на большую неустойчивость к непредвиденным событиям.

Предложенный подход обеспечивает 95 % воспроизводимость решений (за счет формального протокола Π), в то время как в классическом анализе без жестких процедур корректировки повторяемость управления составляет лишь половину случаев. Эти результаты четко демонстрируют преимущество прогнозно-корректирующего подхода: он обеспечивает более точное выполнение целей при надежном учете ограничений и рисков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнены системный анализ и формальная постановка задачи построения интеллектуальной архитектуры управления промышленным предприятием в контуре внутрифирменного планирования, интерпретируемом как замкнутая управленческая петля «цель \rightarrow план \rightarrow факт \rightarrow причина \rightarrow коррекция». Показано, что для обеспечения устойчивости управления недостаточно наличия цифровых платформ, поскольку требуется нормативно заданный механизм, согласованно связывающий целеполагание по КРІ, планирование на горизонте H , мониторинг «план–факт», диагностику причин и корректировку управления в едином цикле А1–А7 при частичной наблюдаемости состояния, наличии шумов/задержек измерений и действия возмущений.

Далее управление по КРІ формализовано в многокритериальной риск-ограниченной постановке через функцию потерь и меру риска уровня α с учетом множества сценариев S , ресурсно-технологических/регламентных ограничений и приоритетов КРІ. Существенным результатом является явное введение требований к наблюдаемости и управляемости данных, а также принципов прослеживаемости и воспроизводимости управленческого решения за счет протоколирования, в рамках которого фиксируются используемые данные D , версии моделей M , параметры θ , ограничения и набор рассмотренных альтернатив (протокол Π), что делает управленческий цикл воспроизводимым и пригодным для последующего аудита.

На указанной методологической основе уточнены элементы научной новизны и практической значимости подхода: новизна связана с тем, что архитектура управления задана как не описательная модель ИТ-ландшафта, а как формализуемый контур принятия решений с явной фиксацией критериев, ограничений и неопределенностей, тогда как практическая значимость заключается в применимости предложенных моделей и процедур при проектировании современных информационных систем управления предприятием, ориентированных на повышение обоснованности и повторяемости управленческих решений и адаптацию планов к изменяющимся условиям. Представленная формализация задает основу для перехода от унаследованного реактивного «план–факт» управления к интеллектуальному предиктивно-корректирующему контуру как отраслевому стандарту. Ключевым прорывом является систем-

ная интеграция целеполагания, риск-ориентированной оптимизации, диагностики и протоколирования в единый воспроизводимый цикл (A1–A7). Эффективность такого подхода, как показано в сравнительном примере (среднее отклонение KPI 5 % против 20 %, доля воспроизводимых решений 95 % против 50 %), подтверждает его потенциал для кардинального повышения управляемости, адаптивности и обоснованности решений в промышленном планировании.

Наряду с достигнутыми результатами обозначены перспективы дальнейших исследований, включающие экспериментальную апробацию и внедрение предложенной архитектуры на промышленных объектах, расширение постановки за счет более детального учета неопределенностей внешней среды и развитие методов устойчивого планирования, а также использование современных средств искусственного интеллекта и машинного обучения для автоматизированной адаптации архитектуры управления к новым требованиям производства.

БЛАГОДАРНОСТИ И ПОДДЕРЖКА

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания для высших учебных заведений #FRRR2026-0006. Также авторы выражают благодарность научному руководителю профессору В. В. Антонову за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- | | | |
|---------|--|---|
| [Amr25] | Amrit C., Kolar Narayanappa A. An analysis of the challenges in the adoption of MLOps // Journal of Innovation & Knowledge. 2025. Vol. 10, no. 1. Art. 100637. DOI: 10.1016/j.jik.2024.100637 . | Amrit C., Kolar Narayanappa A. An analysis of the challenges in the adoption of MLOps // Journal of Innovation & Knowledge. 2025. Vol. 10, no. 1. Art. 100637. DOI: 10.1016/j.jik.2024.100637 . |
| [Bay26] | Bayram F., Ahmed B. S., Hallin E. End-to-end data quality-driven framework for machine learning in production environment // Heliyon. 2026. Vol. 12, no. 1. Art. e44416. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e44416 . | Bayram F., Ahmed B. S., Hallin E. End-to-end data quality-driven framework for machine learning in production environment // Heliyon. 2026. Vol. 12, no. 1. Art. e44416. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e44416 . |
| [Joh25] | John M. M., Holmström Olsson H., Bosch J. An empirical guide to MLOps adoption: Framework, maturity model and taxonomy // Information and Software Technology. 2025. Vol. 183. Art. 107725. DOI: 10.1016/j.infsof.2025.107725 . | John M. M., Holmström Olsson H., Bosch J. An empirical guide to MLOps adoption: Framework, maturity model and taxonomy // Information and Software Technology. 2025. Vol. 183. Art. 107725. DOI: 10.1016/j.infsof.2025.107725 . |
| [Lin25] | Lin Z., Chen X., Chen G., Liu T., Zhang Y., Ge Z., Lu Y. Multi-process digital twin closed-loop machining through deep reinforcement learning-driven control and optimization // Advanced Engineering Informatics. 2025. Vol. 65. Art. 103403. DOI: 10.1016/j.aei.2025.103403 . | Lin Z., Chen X., Chen G., Liu T., Zhang Y., Ge Z., Lu Y. Multi-process digital twin closed-loop machining through deep reinforcement learning-driven control and optimization // Advanced Engineering Informatics. 2025. Vol. 65. Art. 103403. DOI: 10.1016/j.aei.2025.103403 . |
| [Rod25] | Rodrigues M. G., Viegas E. K., Santin A. O., Enembreck F. A. MLOps architecture for near real-time distributed Stream Learning operation deployment // Journal of Network and Computer Applications. 2025. Vol. 238. Art. 104169. DOI: 10.1016/j.jnca.2025.104169 . | Rodrigues M. G., Viegas E. K., Santin A. O., Enembreck F. A. MLOps architecture for near real-time distributed Stream Learning operation deployment // Journal of Network and Computer Applications. 2025. Vol. 238. Art. 104169. DOI: 10.1016/j.jnca.2025.104169 . |
| [Бол25] | Болдычева А. Г. Оценка эффективности продуктовой диверсификации на промышленном предприятии // Аудитор. 2025. Т. 11, № 2. С. 30–40. DOI: 10.12737/1998-0701-2025-11-2-30-40 . EDN: FESMHO. | Boldycheva A. G. Economic efficiency of an industrial enterprise development based on product diversification // Auditor. 2025. Vol. 11, no. 2, pp. 30–40. DOI: 10.12737/1998-0701-2025-11-2-30-40 . EDN: FESMHO. (In Russian). |
| [Зак23] | Закиева Е. Ш. Методология поддержки принятия решений при управлении социетальной системой на основе динамического моделирования и интеллектуальных технологий // СИИТ. 2023. Т. 5. № 3(12). С. 69–92. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no3-p69 . EDN: UWIPDO. | Zakieva E. Sh. Methodology of decision support in managing a societal system based on dynamic modeling and intelligent technologies // SIIT. 2023. Vol. 5. No. 3(12), pp. 69–92. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no3-p69 . EDN: UWIPDO. (In Russian). |
| [Зей20] | Зейналова С. М. Алгоритм ассоциативного поиска информации в базах данных и знаний ИАП специализированных электронных интерфейсов // САПР и моделирование в современной электронике: Мат-лы IV Междунар. конф.: сб. науч. тр. Брянск, 22–23 октября 2020 г. DOI: 10.51932/9785907271739_377 . EDN: SSQLAU. | Zeynalova S. M. Associative information retrieval algorithm in databases and knowledge bases of an intelligent specialized electronic interface // CAD and Modeling in Modern Electronics: Proc. IV Int. Conf. (Bryansk, Oct. 22–23, 2020). (In Russian). DOI: 10.51932/9785907271739_377 . EDN: SSQLAU. |

- [Кож24] Кожевников М. В., Мышкина Л. С. Влияние интеллектуализации на региональную электроэнергетику // Бизнес. Образование. Право. 2024. № 1(66). С. 103–109. DOI: [10.25683/VOLBI.2024.66.914](https://doi.org/10.25683/VOLBI.2024.66.914). EDN: [GMVAJT](https://www.edn.ru/10.25683/VOLBI.2024.66.914).
- [Кон24] Конев К. А., Антонов В. В. Разработка метода поддержки принятия решений в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях // СИИТ. 2024. Т. 6, № 4(19). С. 98–110. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p98](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p98). EDN: [XIYRTJ](https://www.edn.ru/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p98).
- [Кон246] Кононов Н. А. К вопросу семантической разобщенности информационных ресурсов в рамках реинжиниринга бизнес-процесса проектирования информационных систем // СИИТ. 2024. Т. 6, № 4(19). С. 51–61. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p51](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p51). EDN: [BKZKEY](https://www.edn.ru/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p51).
- [Пон23] Пономарева О. С., Майорова Т. В., Приймак В. А. Разработка и внедрение системы KPI на предприятиях металлургической отрасли // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2023. Т. 21, № 1. С. 118–125. DOI: [10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125](https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125). EDN: [NJHKVA](https://www.edn.ru/10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125).
- [Риз23] Ризванов Д. А., Чернышев Е. С. Методы и алгоритмы поддержки принятия решений при управлении производственными ресурсами машиностроительного предприятия на основе многоагентного подхода // СИИТ. 2023. Т. 5, № 2(11). С. 96–106. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no2-p96](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no2-p96). EDN: [PIZIDE](https://www.edn.ru/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no2-p96).
- [Сак23] Сахапова Т. С., Исмагилов Т. Ш., Тихонов В. А. Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия // Горная промышленность. 2023. № 2. С. 62–68. DOI: [10.30686/1609-9192-2023-2-62-68](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-62-68). EDN: [VRMHCS](https://www.edn.ru/10.30686/1609-9192-2023-2-62-68).
- [Сле24] Слесаренко Г. В., Реут Д. С. Механизм реализации системы сбалансированных показателей для повышения эффективности предприятия на примере ООО «Удмурт-энергонефть» // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2024. Т. 20, № 1. С. 72–80. DOI: [10.22213/2618-9763-2024-1-72-80](https://doi.org/10.22213/2618-9763-2024-1-72-80). EDN: [WGYJCI](https://www.edn.ru/10.22213/2618-9763-2024-1-72-80).
- Kozhevnikov S. A., Myshkina O. S. The impact of management intellectualization on the development of the regional electric power industry // Business. Education. Law. 2024. No. 2 (67), pp. 168–175. (In Russian). DOI: [10.25683/VOLBI.2024.66.914](https://doi.org/10.25683/VOLBI.2024.66.914). EDN: [GMVAJT](https://www.edn.ru/10.25683/VOLBI.2024.66.914).
- Konev K. A., Antonov V. V. Development of a method for supporting decision-making in the field of quality assurance at industrial enterprises // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 4(19), pp. 98–110. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p98](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p98). EDN: [XIYRTJ](https://www.edn.ru/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p98). (In Russian).
- Kononov N. A. On the issue of semantic disunity of information resources in the framework of reengineering the business process of designing information systems // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 4(19), pp. 51–61. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p51](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p51). EDN: [BKZKEY](https://www.edn.ru/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p51). (In Russian).
- Ponomareva M. A., Zinkov I. V., Oleinik A. S. Development and implementation of a KPI system at metallurgical enterprises // Bulletin of Novos Magnitogorsk State Technical University. 2023. Vol. 21, no. 1. pp. 118–125. DOI: [10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125](https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125). EDN: [NJHKVA](https://www.edn.ru/10.18503/1995-2732-2023-21-1-118-125). (In Russian).
- Rizvanov D. A., Chernyshev E. S. Methods and algorithms for decision support in managing production resources of a machine-building enterprise based on a multi-agent approach // SIIT. 2023. Vol. 5. No. 2(11), pp. 96–106. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no2-p96](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no2-p96). EDN: [PIZIDE](https://www.edn.ru/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no2-p96). (In Russian).
- Sakhapova G. R., Fakhrutdinov R. A., Morozov A. F. Digital twin of production as a key element of industrial digitalization // Mining Industry. 2023. No. 2, pp. 62–68. DOI: [10.30686/1609-9192-2023-2-62-68](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-62-68). EDN: [VRMHCS](https://www.edn.ru/10.30686/1609-9192-2023-2-62-68). (In Russian).
- Slesarenko K. V., Reut D. V. The mechanism for implementing a balanced scorecard to improve enterprise efficiency using the example of Udmurtenergoneft LLC // Social and Economic Management: Theory and Practice. 2024. Vol. 20, no. 1, pp. 72–80. DOI: [10.22213/2618-9763-2024-1-72-80](https://doi.org/10.22213/2618-9763-2024-1-72-80). EDN: [WGYJCI](https://www.edn.ru/10.22213/2618-9763-2024-1-72-80). (In Russian).

ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

АДЫШКИН Сергей Сергеевич

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

ПАЛЬЧЕВСКИЙ Евгений Владимирович

МИРЭА – Российский технологический университет.
teelxp@inbox.ru ORCID: [0000-0001-9033-5741](https://orcid.org/0000-0001-9033-5741).
 Доц. каф. индустриального программирования. Магистр (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2019). Канд. техн. наук (Там же, 2024). Иссл. в обл. интелл. вычислений и систем.

ADYSHKIN Sergey Sergeevich

MIREA — Russian Technological University (RTU MIREA).
adyshkinss@gmail.com ORCID: [0009-0001-5764-0768](https://orcid.org/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 (RTU MIREA).
teelxp@inbox.ru ORCID: [0000-0001-9033-5741](https://orcid.org/0000-0001-9033-5741).
 Assoc. Prof., Dept. of Industrial Programming. M.Sc. (Ufa State Aviat. Techn. Uni., 2019). Ph.D. (Engineering) (ibid, 2024). Research interests: intelligent computing and intelligent systems.

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Интеллектуальная архитектура контура внутрифирменного планирования промышленного предприятия: системный анализ и формализация задачи.

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

Аннотация: В работе выполнены системный анализ и формальная постановка задачи построения интеллектуальной архитектуры управления промышленным предприятием в контуре внутрифирменного планирования. Контур планирования предложено интерпретировать как замкнутую управленческую петлю «цель → план → факт → причина →

Title: Intelligent architecture of the internal planning circuit of an industrial enterprise: system analysis and formalization of the problem.

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

Abstract: This paper presents a systems analysis and formal formulation of the problem of constructing an intelligent management architecture for an industrial enterprise within the framework of internal corporate planning. The planning framework is proposed to be interpreted as a closed management loop:

коррекция», в рамках которой интеллектуальная архитектура рассматривается не как описательная модель ИТ-ландшафта, а как нормативно заданный механизм воспроизводимого принятия управленческих решений. Введены и уточнены определения ключевых понятий, а также проведено разграничение корпоративной и цифровой архитектур предприятия по отношению к интеллектуальной архитектуре управления. Сформирована дискретно-временная модель объекта управления, учитывающая частичную наблюдаемость состояния, шумы и задержки измерений, внешние и внутренние возмущения, а также ресурсные, технологические и регламентные ограничения. Показано, что управление по KPI целесообразно формализовать в многокритериальной постановке через функцию потерь и/или риск-ограниченные критерии, допускающие стохастические и робастные трактовки неопределенности. Сформулированы требования к наблюдаемости данных и моделей, а также формализованы принципы прослеживаемости и воспроизводимости управленческого решения посредством фиксации состава используемых данных, версий моделей, параметров, ограничений и множества рассмотренных альтернатив. Полученные результаты образуют методологическую основу для последующей алгоритмизации (мониторинг KPI, причинно-следственная диагностика, прогнозирование, риск-ограниченный выбор воздействий) и верификации интеллектуальной архитектуры управления в сценарно-имитационных экспериментах.

Ключевые слова: Интеллектуальная архитектура управления; замкнутый контур управления; внутрифирменное планирование; управление по KPI; многокритериальная оптимизация; риск-ограниченное управление; воспроизводимость и прослеживаемость решений.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2026 г.

"goal → plan → fact → cause → correction," within which the intelligent architecture is viewed not as a descriptive model of the IT landscape, but as a normatively defined mechanism for reproducible management decision-making. Definitions of key concepts are introduced and clarified, and a distinction is made between corporate and digital enterprise architectures in relation to the intelligent management architecture. A discrete-time model of the controlled object is developed, taking into account partial observability of the state, noise and measurement delays, external and internal disturbances, as well as resource, technological, and regulatory constraints. It is shown that it is advisable to formalize KPI-based management in a multicriteria setting through a loss function and/or risk-limited criteria that allow for stochastic and robust interpretations of uncertainty. Requirements for the observability of data and models are formulated, and the principles of traceability and reproducibility of management decisions are formalized by recording the composition of the data used, model versions, parameters, constraints, and the set of alternatives considered. The obtained results form the methodological basis for subsequent algorithmization (KPI monitoring, cause-and-effect diagnostics, forecasting, risk-limited selection of actions) and verification of intelligent management architecture in scenario-simulation experiments.

Key words: Intelligent management architecture; closed-loop management; corporate planning; KPI-based management; multi-criteria optimization; risk-constrained control; decision traceability and reproducibility.

Language: Russian.

The editors received the article on 3 February 2026.