

Метод адаптивной трёхмерной фильтрации ключевых событий в системах управления сооружением сложных инженерных объектов

С.А. Клятецкий

Аннотация— В статье рассматривается проблема управления строительством сложных инженерных объектов в условиях непрерывного роста объёмов цифровых данных, формируемых системами календарно-сетевое планирования, ERP, IoT-мониторинга, телематики техники и учёта выполненных работ. На примере строительства энергоблока Курской АЭС-2 показано, что существующие методы контроля проектов (CPM, EVM, ресурсный анализ) не обеспечивают комплексного выявления критических отклонений, поскольку анализируют временные, стоимостные и ресурсные параметры раздельно. Предложен метод трёхмерной фильтрации ключевых событий на основе интеграции отклонений по срокам, стоимости и ресурсному обеспечению в единый вектор состояния операции. Для выделения операций, требующих управленческого внимания, введён адаптивный порог фильтрации, автоматически подстраивающийся под текущее распределение отклонений. Метод реализован и экспериментально верифицирован на данных 396 дней строительства Курской АЭС-2 объёмом более 1,2 млрд записей. Показано, что предложенный подход обеспечивает сокращение анализируемого множества операций на 92,9% при сохранении полноты обнаружения критических отклонений для операций классов безопасности CSL 1–2 на уровне 99,8%.

Ключевые слова— управление строительством, атомные электростанции, цифровой двойник, метод критического пути, метод освоенного объёма, ресурсные ограничения, адаптивная фильтрация.

I. ВВЕДЕНИЕ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Современное строительство атомных электростанций представляет собой масштабный проект с высокой степенью технологической и организационной сложности. Сетевой график строительства энергоблока ВВЭР-ТОИ включает для проекта Курской АЭС 14 872 операций, выполняемых планомерно в течение 6–8 лет с участием десятков подрядных организаций и сотен специализированных бригад. Цифровизация строительной площадки — внедрение систем геопозиционирования персонала и техники на базе технологий IoT (Industrial Internet of Things), интеграция данных из систем календарно-сетевое планирования

(Oracle Primavera P6), учётных систем (1C:ERP), актов выполненных работ (КС-2, КС-3), телематики строительных механизмов — приводит к формированию больших объёмов данных. Так, на действующей строительной площадке Курской АЭС-2 за 396 дней эксплуатации системы мониторинга было зарегистрировано свыше 1,2 миллиарда записей (около 3,2 миллионов событий в сутки), характеризующих текущее состояние работ, обеспеченность ресурсами, отклонения от графика и бюджета. Проблема управления сооружением сложных инженерных объектов на основе интеграции фиксированных и динамических потоков данных в условиях временных, финансовых и ресурсных ограничений является критически важной, но на текущий момент не имеет корректного и полного решения. Эта проблема широко обсуждается в современных работах в России и за рубежом [1-13]. Современная постановка практической проблемы: как обеспечить адаптивное управление сооружением сложного инженерного объекта в условиях непрерывно изменяющихся потоков данных о сроках, финансировании, ресурсах и фактическом ходе работ.

Надо отметить увеличение объёма данных само по себе не приводит к повышению качества управленческих решений. Возникает парадокс "data rich, information poor" — избыток сырых данных при дефиците релевантной информации для принятия решений. Лица, принимающие решения (ЛПР), — руководители направлений строительно-монтажных работ (СМР) и пусконаладочных работ (ПНР), главный инженер проекта, члены оперативного штаба — физически не способны обработать весь информационный поток. Когнитивная пропускная способность человека ограничена: при еженедельных совещаниях длительностью 2,5–3 часа возможен детальный разбор не более 80–100 операций (при норме 2–3 минуты на обсуждение одной операции и принятие решения). В то же время в каждый момент времени в работе находится от 1 200 до 5 200 операций в зависимости от фазы проекта, что создаёт неизбежный риск пропуска критических отклонений.

Критичность раннего обнаружения проблем на строительной площадке АЭС обусловлена как

экономическими факторами (стоимость задержки ввода энергоблока в эксплуатацию составляет 10–15 миллионов рублей в сутки для блока мощностью 1200 МВт), так и требованиями безопасности. Анализ международного опыта строительства АЭС (проекты Olkiluoto-3, Flamanville-3, Vogtle-3/4, Hinkley Point C), обобщённый в [14] показывает, что основной причиной задержек и перерасходов бюджета является несвоевременное выявление отклонений от графика и неэффективное управление ресурсами на ранних стадиях проблемы. Позднее обнаружение проблемы (когда резерв времени исчерпан и срыв сроков уже произошёл) резко сужает пространство возможных управленческих решений и увеличивает стоимость корректирующих мер. Систематический анализ причин задержек мегапроектов [15] показывает, что проекты строительства АЭС систематически превышают бюджеты и сроки из-за «оптимистического смещения» прогнозов и недостаточной проработки проекта до начала строительства. Детальный обзор факторов, влияющих на стоимость и сроки строительства АЭС [16], подтверждает критичность раннего обнаружения отклонений. Анализ проекта Olkiluoto-3 [17] и отчёт о проекте Vogtle [18] демонстрируют, что задержки в выявлении проблем приводили к их накоплению и эскалации стоимости корректирующих мер.

Таким образом, задача автоматизированной фильтрации информационного потока с целью выделения компактного множества ключевых событий, требующих приоритетного управленческого внимания, является критически важной для обеспечения своевременности и качества решений при управлении строительством крупных технологически сложных объектов.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ

В практике управления строительными проектами сложились три основных подхода к выявлению проблемных операций, требующих управленческого внимания.

Метод критического пути (Critical Path Method, CPM), предложенный Келли и Уокером в 1959 году [19] основан на анализе сетевого графика работ и выявлении операций с минимальным резервом времени (Total Float, TF). Операции критического пути ($TF = 0$) и околочитического пути ($TF \leq 5 - 10$ дней) рассматриваются как приоритетные, поскольку задержка их выполнения непосредственно сдвигает срок завершения всего проекта. Однако метод CPM оперирует исключительно временным измерением и не учитывает ни фактические затраты, ни обеспеченность операций ресурсами. Операция может находиться на некритическом пути ($TF = 30$ дней), формально имея резерв времени, но фактически испытывать острый дефицит рабочей силы или материалов, что в перспективе приведёт к срыву сроков.

Метод освоенного объёма (Earned Value Management, EVM), стандартизованный в PMI PMBOK и детально описанный Флемингом и Коппельманом [20] позволяет отслеживать отклонения фактических затрат от

плановых через показатели Cost Variance ($CV = EV - AC$) и Schedule Performance Index (SPI). EVM фокусируется на стоимостном измерении проекта и эффективен для выявления операций с перерасходом бюджета. Однако метод не различает причины отклонений: перерасход может быть следствием как неэффективного использования ресурсов, так и объективной нехватки материалов или квалифицированного персонала. Кроме того, EVM слабо применим к операциям на ранних стадиях выполнения (освоенный объём EV близок к нулю), где временные отклонения ещё не транслировались в стоимостные. Применение EVM к проектам строительства АЭС рассмотрено Лоренсом и Вендлингом [21] которые отметили специфику учёта длительных циклов и высоких требований безопасности.

Ресурсный анализ, основанный на контроле обеспеченности операций трудовыми ресурсами, материалами, механизмами и оборудованием, позволяет выявлять дефициты на уровне отдельных типов ресурсов. Системы класса ERP (например, 1С:Управление строительной организацией) обеспечивают учёт плановой и фактической потребности в ресурсах, формирование заявок на поставку материалов, контроль складских остатков. Однако ресурсный анализ изолированно от сроков и бюджета не позволяет оценить критичность нехватки ресурса для проекта в целом: дефицит арматуры для операции критического пути и для некритической операции с резервом времени 60 дней имеют качественно разные последствия, но в рамках чисто ресурсного подхода неразличимы.

Интегрированные подходы, объединяющие CPM и EVM [22] развивают направление комплексного мониторинга проектов, однако не учитывают ресурсное измерение. Расширение метода EVM через концепцию Earned Schedule [23, 24] повышает точность прогнозирования сроков на поздних стадиях проекта, но также остаётся в рамках двумерного анализа (время-стоимость).

Таким образом, ни один из существующих методов не обеспечивает комплексной оценки состояния операции. Практика показывает, что наиболее опасные ситуации возникают на стыке измерений: операция может иметь положительный резерв времени ($TF = 15$ дней, формально не критична с точки зрения CPM), укладываться в бюджет ($CV \geq 0$, формально нормальна с точки зрения EVM), но при этом испытывать критический дефицит специализированных ресурсов (например, отсутствие сертифицированных сварщиков для работ по классу безопасности CSL-1). Одномерные методы пропускают такие ситуации, выявляя проблему лишь постфактум — когда резерв времени исчерпан и срыв сроков уже произошёл.

Опыт реализации проектов строительства АЭС третьего поколения (Olkiluoto-3, Flamanville-3, Vogtle-3/4), обобщённый в отчёте МАГАТЭ IAEA-TECDOC-1651 [14] подтверждает, что задержки графика и перерасходы бюджета в 70–80% случаев были обусловлены не единичными катастрофическими событиями, а накоплением множества «малых»

отклонений, своевременно не выявленных из-за фрагментарности систем мониторинга. Это обосновывает необходимость разработки интегрированного метода фильтрации, учитывающего одновременно временные, стоимостные и ресурсные отклонения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С учетом сказанного, сформулируем явно и формализовано задачу, решаемую в рамках настоящей работы.

Дано:

Сетевой график проекта $G = \{O, P\}$, где O — множество операций (мера $|O| = N$), P — множество отношений предшествования между операциями.

Цифровое состояние строительной площадки представляем многомерный вектор $DSS(t) = \langle P(t), E(t), R(t), M(t) \rangle$, включающий данные о персонале, оборудовании, ресурсах и метриках выполнения работ в момент времени t .

Множество активных операций в текущий момент времени $O(t) \subset O$ — операции, начатые, но не завершённые на момент t (для строительства практического примера сооружения энергоблока ВВЭР-ТОИ мера $|O(t)| \in [1\ 200; 5\ 200]$ в зависимости от фазы проекта).

Требование полноты по безопасности: для операций классов безопасности CSL 1–2 (системы, важные для безопасности, согласно классификации МАГАТЭ) метод должен обеспечить $Recall \geq 95\%$, то есть не пропустить более 5% операций с критическими отклонениями.

Найти:

Метод формирования множества ключевых событий $K(t) \subset O(t)$, обеспечивающий:

Достаточную полноту обнаружения критических отклонений. Операции с высоким риском срыва сроков, перерасхода бюджета или дефицита ресурсов должны быть включены в $K(t)$ с вероятностью, близкой к единице. Для операций классов безопасности CSL 1–2 требование полноты формализуется как $Recall(K, O_{crit}) \geq 0,95$, где O_{crit} — множество операций, фактически требующих управленческого вмешательства (определяется экспертной оценкой).

Эффективную компактность множества $K(t)$: Размер $K(t)$ должен быть когнитивно доступен для управления ЛПР в условиях еженедельных оперативных совещаний. Практический критерий управляемости: $|K(t)| \leq 100–150$ операций, что обеспечивает возможность детального разбора за 2,5–3 часа при норме 2–3 минуты на операцию. Формально: $|K(t)| \ll |O(t)|$, что для типичных значений $|O(t)| \approx 4\ 000$ означает требование редукции в автоматическом режиме на порядок величины.

Вычислительную эффективность: Формирование $K(t)$ должно выполняться в режиме, близком к реальному времени (время формирования < времени принятия одного управленческого решения), что позволяет обновлять множество ключевых событий при каждом изменении состояния $DSS(t)$. При этом должна обеспечиваться масштабируемость метода. Для сетевых графиков масштаба $N \sim 10^4$ операций это

требует алгоритмической сложности не выше $O(N \log N)$.

Обоснованность критерия фильтрации: Метод должен иметь математическое обоснование гарантий полноты и оценки размера $|K(t)|$, не зависящее от специфики конкретного проекта.

Критерии качества решения: Эффективность метода оценивается по стандартным метрикам машинного обучения для задач бинарной классификации. Обозначим:

- TP (*true positive*) — число операций, правильно классифицированных как требующие управленческого внимания;

- FN (*false negative*) — число проблемных операций, не включённых в $K(t)$ (пропуски);

- FP (*false positive*) — число операций, ошибочно включённых в $K(t)$ (ложные срабатывания). Метрики качества фильтрации:

- $Recall$ (полнота) = $TP / (TP + FN)$ — доля выявленных проблемных операций от всех фактически проблемных;

- $Precision$ (точность) = $TP / (TP + FP)$ — доля действительно проблемных среди отобранных в $K(t)$;

- F_1 - score = $2 \cdot Precision \cdot Recall / (Precision + Recall)$ — гармоническое среднее полноты и точности.

Приоритет отдаётся метрике $Recall$ для операций CSL 1–2 (критерий безопасности), при условии приемлемого значения $Precision \geq 80\%$ (ограничение на долю ложных срабатываний).

II. МЕТОД ТРЁХМЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

A. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Формирование множества ключевых событий $K(t)$ основано на анализе текущего цифрового состояния строительной площадки, формализуемого в виде четырёхкомпонентной структуры:

$$DSS(t) = \langle P(t), E(t), R(t), M(t) \rangle \quad (1)$$

где компоненты определяются следующим образом:

P(t) — данные о персонале: геолокация работников в режиме реального времени (системы IoT на базе технологий RFID/UWB с точностью позиционирования $\pm 0,3$ м), закреплённые задачи, принадлежность к подрядным организациям, квалификационные допуски. Источники: системы контроля доступа (СКУД), геопозиционирования персонала, табельного учёта.

E(t) — данные об оборудовании и работах: текущий статус выполнения операций (не начата, в работе, завершена), процент физической готовности, фактические сроки начала и завершения, класс безопасности операции (CSL 1–5 согласно градуированному подходу МАГАТЭ [25]), результаты приёмки (акты освидетельствования скрытых работ, промежуточной приёмки). Источники: Oracle Primavera P6 (сетевой график в формате XER), журналы производства работ, акты КС-2/КС-3.

R(t) — данные о ресурсах: фактическая обеспеченность операций трудовыми ресурсами (количество работников по специальностям),

материалами (складские остатки, заявки на поставку, фактические поставки), строительными механизмами (телематика: местоположение, моточасы, простой), энергоресурсами (электроэнергия, сжатый воздух, технологические газы), специализированным оборудованием. Источники: 1С:ERP (управление складом, закупки), телематические системы строительной техники, диспетчеризация энергоснабжения.

$M(t)$ — агрегированные метрики: ключевые показатели эффективности (KPI) на уровне направлений работ и подрячков, тренды отклонений, прогнозные оценки сроков завершения (методом Earned Schedule или Monte Carlo), индикаторы качества (процент устранённых замечаний, доля переделок). Источники: аналитические витрины данных, расчётные модули СППР.

Объём данных. На строительной площадке Курской АЭС-2 в течение 396 дней эксплуатации системы было зарегистрировано 1,2 миллиарда записей (суточный поток ~3,2 миллиона событий), общий объём хранилища составил 979 Гб. Данные обновляются с различной частотой: геолокация — каждые 30 секунд, телематика механизмов — каждые 5 минут, статус операций — ежедневно при актуализации сетевого графика, складские остатки — в режиме реального времени при движении материалов.

Множество активных операций $O(t)$: Из полного сетевого графика $G = (O, P)$, $|O| = 14\,872$, в каждый момент времени t в работе находится подмножество операций $O(t) = \{o_i \in O : t \geq ES(o_i) \wedge t < F(o_i)\}$, где ES (Early Start) — ранний срок начала операции, EF (Early Finish) — ранний срок окончания согласно расчёту по методу критического пути. В реальности для проекта Курская АЭС-2 размер активного множества варьировался в диапазоне $|O(t)| \in [1\,247; 5\,186]$ в зависимости от фазы строительства, среднее значение составило 4 127 операций.

В. ВЕКТОР ОТКЛОНЕНИЙ

Для каждой активной операции $o_i \in O(t)$ вычисляется трёхмерный вектор отклонений от плановых значений:

$$\Phi(o_i, t) = \langle \varphi_T(o_i, t), \varphi_C(o_i, t), \varphi_R(o_i, t) \rangle \in \mathbb{R}^3 \quad (2)$$

где компоненты φ_T , φ_C , φ_R характеризуют отклонения по времени, стоимости и ресурсам соответственно.

Компонента φ_T — отклонение по срокам (временное измерение). Основана на методе критического пути (CPM). Для операции o_i , начатой в момент t_{start} , текущее отклонение от планового графика определяется как:

$$\varphi_T(o_i, t) = \max\{0, (t - ES(o_i) - d_{elapsed}(o_i, t)) / \max\{TF(o_i), d(o_i)\}\} \quad (3)$$

где $ES(o_i)$ — плановый ранний срок начала операции (из сетевого графика), $d_{elapsed}(o_i, t) = t - t_{start}$ —

фактическая длительность выполнения на текущий момент, $TF(o_i)$ — полный резерв времени (Total Float), $d(o_i)$ — плановая длительность операции. Нормировка на $\max\{TF, d\}$ обеспечивает сопоставимость отклонений для операций разной длительности и с разным резервом времени. Функция $\max\{0, \dots\}$ отсекает случаи опережения графика (отрицательные отклонения), поскольку они не требуют управленческого вмешательства в контексте задачи фильтрации проблемных операций.

Компонента φ_C — отклонение по стоимости (экономическое измерение). Основана на методе освоенного объёма (EVM). Для операции o_i в момент t вычисляется отклонение фактических затрат от освоенного объёма:

$$\varphi_C(o_i, t) = \max\{0, (AC(o_i, t) - EV(o_i, t)) / BAC(o_i)\} \quad (4)$$

где AC (Actual Cost) — фактические затраты на операцию на момент t (из актов КС-2, КС-3), EV (Earned Value) — освоенный объём, равный $BAC(o_i) \times$ (процент физической готовности операции), BAC (Budget at Completion) — бюджет операции по завершении. Положительное значение φ_C указывает на перерасход бюджета относительно выполненного объёма работ. Нормировка на BAC приводит отклонение к безразмерному виду, сопоставимому для операций с различными бюджетами (от сотен тысяч до десятков миллионов рублей).

Компонента φ_R — отклонение по ресурсам. Характеризует максимальный дефицит среди всех типов ресурсов, необходимых для выполнения операции:

$$\varphi_R(o_i, t) = \max_{\{r \in R\}} \{\max\{0, (R_{plan}(o_i, r, t) - R_{fact}(o_i, r, t)) / R_{plan}(o_i, r, t)\}\} \quad (5)$$

где $R = \{\text{трудовые ресурсы, материалы, механизмы, энергоресурсы, специализированное оборудование}\}$ — множество типов ресурсов ($m = 5$ для проекта Курская АЭС-2), $R_{plan}(o_i, r, t)$ — плановая потребность операции o_i в ресурсе типа r на момент t (из ресурсного календаря сетевого графика), $R_{fact}(o_i, r, t)$ — фактическая обеспеченность ресурсом (из данных $DSS(t)$: складские остатки, количество работников на объекте согласно геопозиционированию, доступность механизмов). Использование максимума по типам ресурсов реализует "принцип узкого места": операция характеризуется наиболее критичным дефицитом, независимо от обеспеченности другими ресурсами. Это обеспечивает редукцию размерности с $(2 + m)$ измерений (время, стоимость, m типов ресурсов) к трём (время, стоимость, ресурсы), сохраняя при этом информацию о наиболее проблемном аспекте ресурсного обеспечения.

Свойства вектора Φ :

1. Безразмерность: все компоненты $\varphi_T, \varphi_C, \varphi_R \in [0; 1]$ (нормированы на плановые значения).
2. Неотрицательность: отклонения "в лучшую сторону" (опережение графика, экономия бюджета, избыток ресурсов) обнуляются функцией $\max\{0, \dots\}$.

3. Независимость: компоненты вычисляются по данным из непересекающихся источников (сетевой график, финансовый учёт, ресурсные данные).

С. АДАПТИВНЫЙ ПОРОГ

Для выделения операций со значимыми отклонениями используется евклидова норма вектора Φ :

$$\|\Phi(o_i, t)\| = \sqrt{(\varphi_{T^2} + \varphi_{C^2} + \varphi_{R^2})} \quad (6)$$

которая характеризует "общую величину отклонения" операции от плана по всем трём измерениям одновременно. Норма $\|\Phi\| \in [0; \sqrt{3}]$, при этом $\|\Phi\| = 0$ соответствует полному соответствию плану, $\|\Phi\| = \sqrt{3}$ — гипотетическому случаю максимального отклонения по всем компонентам. Нами выше было показана невозможность обработки в центре принятия решения верхнего уровня всех отклонений $\|\Phi(o_i, t)\| > 0$. Следовательно, нужен алгоритм выбора обрабатываемых на верхнем уровне управления событий. Норма вектора отклонений может быть разумным кандидатом на роль параметра такой классификации. Однако алгоритм классификации требует обсуждения. Простейший критерий — фиксированный статический порог неприемлем вследствие кардинально различной мощности множества активных операций для разных стадий управляемого процесса сооружения АЭС, которое может различаться на порядки. Подход «лечим что болит сильнее всего насколько хватает рук» - механическое обрезание фиксированного числа событий с максимальными отклонениями широко применяется на практике. Но не позволяет осознавать эффективность управления в каждый момент времени вследствие отсутствия объективного и обоснованного критерия. По нашему мнению, необходимо сформулировать критерий отнесения события с отклонением к классу контролируемого на уровне ЛПР верхнего уровня. Такой критерий должен быть универсальным — реализуемым для разных проектов и их различных этапов с разными характеристиками. Он должен опираться только на внутренние характеристики проекта, процедура должна быть автоматизирована (не содержать экспертной компоненты как минимум в первом приближении) и обладать умеренной вычислительной сложностью даже при пиковых нагрузках. Наша гипотеза состоит в том, что одним из удовлетворяющих этим требованиям вариантов может быть адаптивный порог для классификации (фильтрации) из множества всех активных событий в подмножество особо контролируемых и управляемых событий на основании распределения характеристики $\|\Phi(o_i, t)\|$ в множестве активных событий. Такой критерий (назовем его термином «адаптивный порог») и алгоритм его применения должны обеспечивать выполнение следующих требований:

1. **Требование когнитивной управляемости.** Размер множества $K(t)$ должен оставаться ограниченным ($|K(t)| \leq 100 - 150$ операций) на протяжении всего проекта для обеспечения возможности детального разбора на еженедельных совещаниях. Статический порог не гарантирует стабильности $|K(t)|$: в спокойные периоды может давать $K(t) = \emptyset$ (порог слишком высок относительно фактических отклонений), в критические

периоды — $|K(t)| > 1000$ (порог слишком низок), что превышает когнитивную пропускную способность ЛПР.

2. **Разномасштабность отклонений на полном цикле сооружения.** Строительство АЭС занимает 6–8 лет и включает качественно различные фазы: подготовительные работы (земляные работы, устройство котлована), строительно-монтажные работы (возведение зданий и сооружений, монтаж оборудования), пусконаладочные работы (испытания систем, устранение замечаний). Каждая фаза характеризуется различным "фоновым уровнем проблемности" $\mu_{\Phi}(t)$. Эмпирический анализ данных Курской АЭС-2 показал, что среднее значение нормы отклонений варьируется в диапазоне $\mu_{\Phi} \in [0,04; 0,31]$ — изменение почти в 8 раз. Статический порог, настроенный на одну фазу, становится неадекватным для другой: порог $\theta = 0,15$, оптимальный для начальной фазы ($\mu_{\Phi} \approx 0,05$), в фазе пикового строительства ($\mu_{\Phi} \approx 0,28$) приведёт к включению в $K(t)$ подавляющего большинства операций, многие из которых имеют отклонения, статистически нормальные для данной фазы.

3. **Относительная стабильность управляющего ресурса.** Состав оперативного штаба, частота совещаний, доступное время для анализа операций остаются приблизительно постоянными на протяжении проекта. Следовательно, "пропускная способность" системы управления ограничена константой $\sim 80-120$ операций за одно совещание. Для соответствия этому ограничению размер $|K(t)|$ должен оставаться стабильным независимо от изменения масштаба проблемности проекта, что достижимо только при адаптации порога к текущему распределению отклонений.

То есть центральным элементом метода является адаптивный порог $\theta(t)$ для текущего множества активных событий. Нами предлагается подход к определению адаптивного порога по следующей процедуре:

$$\theta(t) = \mu_{\Phi}(t) + \beta \cdot \sigma_{\Phi}(t) \quad (7)$$

где $\mu_{\Phi}(t) = (1/|O(t)|) \sum_{\{o_i \in O(t)\}} \|\Phi(o_i, t)\|$ — среднее значение нормы отклонений по всем активным операциям в момент t , $\sigma_{\Phi}(t) = \sqrt{[(1/|O(t)|) \sum_{\{o_i \in O(t)\}} (\|\Phi(o_i, t)\| - \mu_{\Phi}(t))^2]}$ — стандартное отклонение, β — параметр чувствительности фильтра.

Очевидно, что мы как минимум выполнили требования автоматической подстройки под текущее распределение отклонений. Кроме того, обсудим другие характеристики так определяемого порога.

Физический смысл компонент:

Величина $\mu_{\Phi}(t)$ характеризует "средний уровень проблемности" проекта в момент t : в спокойные периоды (начало строительства, подготовительные работы) $\mu_{\Phi} \approx 0,04 - 0,08$, в периоды интенсивного строительства с высокой нагрузкой $\mu_{\Phi} \approx 0,20 - 0,31$. Таким образом, μ_{Φ} задаёт масштаб отклонений, характерный для текущей фазы проекта.

Величина $\sigma_{\Phi}(t)$ отражает "разброс проблемности" операций: малое значение $\sigma_{\Phi} \approx 0,02$ соответствует однородной ситуации (все операции примерно в одинаковом состоянии), большое $\sigma_{\Phi} \approx 0,15$ указывает на высокую неоднородность (часть операций выполняется нормально, часть — с критическими отклонениями). Стандартное отклонение σ_{Φ} определяет ширину распределения и задаёт "контекст вариации", относительно которого оценивается значимость отклонения конкретной операции.

Свойство самонормировки:

Критерий $\|\Phi\| > \theta(t)$ эквивалентен условию $(\|\Phi\| - \mu_{\Phi}) / \sigma_{\Phi} > \beta$, где левая часть представляет собой z-оценку — стандартизованное отклонение в единицах σ_{Φ} , безразмерное и инвариантное к масштабу данных. Это обеспечивает автоматическую адаптацию порога к изменяющимся условиям проекта: если разброс σ_{Φ} велик (высокая вариабельность состояния операций), порог θ повышается, фильтруя только экстремальные отклонения; если разброс мал (операции в однородном состоянии), порог снижается, обеспечивая высокую чувствительность к малым отклонениям от нормы. Результат: доля операций, попадающих в множество ключевых событий по критерию отклонения, остаётся стабильной (~7%) независимо от того, находится ли проект в спокойной фазе ($\mu_{\Phi} = 0,05$) или в периоде высокой проблемности ($\mu_{\Phi} = 0,30$).

Калибровка параметра β :

Значение $\beta = 1,5$ получено эмпирически на основе следующей процедуры. Экспертная панель из 5 специалистов (главный инженер проекта, 2 руководителя направлений СМР, 2 специалиста по ПНР, суммарный опыт управления строительством АЭС 87 лет) независимо разметила ключевые события на контрольной выборке из 30 дней (ноябрь 2023 — январь 2024), охватывающей различные фазы проекта. Операция считалась ключевым событием, если её отметили как требующую управленческого внимания не менее 3 из 5 экспертов (порог согласия 60%). Для значений $\beta \in \{1,0; 1,1; 1,2; \dots; 2,5\}$ (с шагом 0,1) были вычислены метрики Recall, Precision и F1-score по сравнению с экспертной разметкой. Значение $\beta = 1,5$ обеспечило оптимальный баланс: $Recall = 97,8\%$ для операций CSL 1–2 (выполнено требование $\geq 95\%$), $Precision = 82,0\%$, $F_1 = 89,2\%$, средний размер $|K(t)| = 287$ операций (7,1% от активных). При $\beta = 1,0$ размер множества был избыточным (847 операций, 18,3%), при $\beta = 2,0$ — недостаточная полнота ($Recall = 86,1\%$ для CSL 1–2, не выполнено требование).

D. МНОЖЕСТВО КЛЮЧЕВЫХ СОБЫТИЙ

Множество ключевых событий $K(t)$ формируется как объединение операций, удовлетворяющих хотя бы одному из трёх критериев:

$$K(t) = \{o_i \in O(t): \|\Phi(o_i, t)\| > \theta(t) \vee TF(o_i) \leq TF_{thr} \vee csl(o_i) \leq 2\} \quad (8)$$

где критерии определяются следующим образом:

- Критерий 1 (значительное отклонение): $\|\Phi(o_i, t)\| > \theta(t)$

— норма вектора отклонений операции превышает адаптивный порог, что указывает на статистически значимое (более чем на $\beta = 1,5$ стандартных отклонений) отклонение от среднего уровня по проекту.

- Критерий 2 (критический путь): $TF(o_i) \leq TF_{thr}$ — операция находится на критическом или околоскритическом пути сетевого графика. Пороговое значение $TF_{thr} = 5$ рабочих дней (одна рабочая неделя) выбрано исходя из типичного цикла принятия управленческих решений: выявление проблемы (1–2 дня), разработка корректирующих мер (2–3 дня), резерв на реализацию. Операции с $TF \leq 5$ дней включаются в $K(t)$ безусловно, даже если $\|\Phi\| < \theta(t)$, поскольку любая задержка таких операций непосредственно сдвигает срок завершения проекта.

- Критерий 3 (класс безопасности): $csl(o_i) \leq 2$ — операция относится к классам безопасности I или II согласно градуированному подходу МАГАТЭ (SSG-52). CSL-1 включает системы, выполняющие функции безопасности (системы аварийного охлаждения активной зоны, защитная оболочка), CSL-2 — системы, важные для безопасности (системы нормальной эксплуатации, обеспечивающие условия для работы систем безопасности). Такие операции включаются в $K(t)$ приоритетно, поскольку их срыв или некачественное выполнение создаёт риски для безопасности энергоблока и может привести к отказу регулятора (Ростехнадзор) в выдаче разрешения на ввод в эксплуатацию. Безусловное включение операций CSL 1–2 в $K(t)$ реализует принцип «глубокоэшелонированной защиты» (defence in depth) согласно требованиям МАГАТЭ [26], обеспечивая приоритетное управленческое внимание к операциям, критичным для безопасности энергоблока.

Логика объединения критериев: оператор дизъюнкции (\vee) обеспечивает включение операции в $K(t)$ при выполнении любого из трёх условий. Это гарантирует, что:

- Операции с большими отклонениями (Критерий 1) не будут пропущены, даже если они не критичны по срокам и имеют низкий класс безопасности;

- Операции критического пути (Критерий 2) всегда видимы для ЛПП, даже при малых текущих отклонениях $\|\Phi\|$;

- Операции CSL 1–2 (Критерий 3) обеспечены приоритетным вниманием независимо от величины отклонений и положения в сетевом графике.

Такая конструкция критерия обеспечивает устойчивость метода: даже если адаптивный порог $\theta(t)$ в конкретный момент времени оказался завышенным (например, из-за выброса в распределении $\|\Phi\|$), критические по срокам и безопасности операции гарантированно попадут в $K(t)$ по критериям 2 и 3.

E. АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ

Вычислительная реализация метода представлена в виде Algorithm 1 в нотации структурированного псевдокода. Используются стандартные обозначения: присваивание \leftarrow , комментарии \triangleright , итерация for all $x \in X$, условие if...then, операции над множествами (\emptyset — пустое множество, \cup — объединение). Функции

ComputeTimeDeviation, ComputeCostDeviation, ComputeResourceDeviation реализуют вычисления компонент вектора Φ по формулам (3)–(5) соответственно.

Algorithm 1 Формирование множества ключевых событий

Вход: $O(t)$ — множество активных операций, $DSS(t)$ — цифровое состояние площадки
 Выход: $K(t)$ — множество ключевых событий
 1: \triangleright Этап 1: Вычисление векторов отклонений
 2: for all $o_i \in O(t)$ do
 3: $\varphi_T(o_i) \leftarrow \text{ComputeTimeDeviation}(o_i, DSS)$ \triangleright формула (3)
 4: $\varphi_C(o_i) \leftarrow \text{ComputeCostDeviation}(o_i, DSS)$ \triangleright формула (4)
 5: $\varphi_R(o_i) \leftarrow \text{ComputeResourceDeviation}(o_i, DSS)$ \triangleright формула (5)
 6: $\Phi(o_i) \leftarrow \langle \varphi_T(o_i), \varphi_C(o_i), \varphi_R(o_i) \rangle$ \triangleright формула (2)
 7:
 8: \triangleright Этап 2: Вычисление адаптивного порога
 9: $\mu_\Phi \leftarrow (1/|O(t)|) \sum_{\{o_i \in O(t)\}} \|\Phi(o_i)\|$
 10: $\sigma_\Phi \leftarrow \sqrt{[(1/|O(t)|) \sum_{\{o_i \in O(t)\}} (\|\Phi(o_i)\| - \mu_\Phi)^2]}$
 11: $\theta \leftarrow \mu_\Phi + \beta \cdot \sigma_\Phi$ $\triangleright \beta = 1,5$
 12:
 13: \triangleright Этап 3: Формирование множества $K(t)$
 14: $K \leftarrow \emptyset$
 15: for all $o_i \in O(t)$ do
 16: if $\|\Phi(o_i)\| > \theta$ or $TF(o_i) \leq 5$ or $csl(o_i) \leq 2$ then \triangleright формула (8)
 17: $K \leftarrow K \cup \{o_i\}$
 18: return K

Вычислительная сложность алгоритма:

- Строки 2–6 (вычисление Φ для всех операций): $O(N \cdot m)$, где $N = |O(t)|$, $m = 5$ — число типов ресурсов (константа).

- Строки 9–11 (статистики μ , σ , порог θ): $O(N)$.
- Строки 15–17 (проверка критериев): $O(N)$.
- Общая сложность без сортировки: $O(N \cdot m + N + N) = O(N)$ при $m = const$.

Если требуется упорядочить $K(t)$ по убыванию $\|\Phi\|$ для приоритизации операций при обсуждении на совещании, добавляется этап сортировки: $O(|K| \log |K|)$. В худшем случае $|K| \approx |O|$ (все операции попали в K), что даёт $O(N \log N)$. Таким образом, суммарная вычислительная сложность метода $O(N \log N)$ в худшем случае, $O(N)$ в типичном случае ($|K| \ll |O|$).

Практическая реализация:

Метод реализован на языке Python 3.10 с использованием PostgreSQL для хранения и обработки данных $DSS(t)$. Измерения выполнены на сервере с процессором Intel Xeon Silver 4214R (2,4 ГГц). Время формирования $K(t)$ для сетевого графика $N = 14\ 872$ операций составило менее 0,1 секунды, что подтверждает применимость метода для оперативного управления в режиме, близком к реальному времени. Детальные измерения на различных размерах активного множества $|O(t)|$

приведены в разделе IV (Таблица экспериментов).

III. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В данном разделе мы теоретически обоснуем соответствие предлагаемой схемы отбора событий, подлежащих контролю на высшем уровне принятия решений в проекте сформулированным выше требованиям.

A. ОГРАНИЧЕННОСТЬ РАЗМЕРА $K(t)$

Лемма 1 (о связи порога и размера $K(t)$).

При $\beta = 1,5$ доля активных операций с $\|\Phi\| \geq \theta(t)$ не превышает 30,8% независимо от распределения отклонений (при конечных первом и втором моментах).

Доказательство.

Применяем одностороннее неравенство Кантелли [27] для любого распределения случайной величины X с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 :

$$P(|X - \mu| \geq k \cdot \sigma) \leq 1/(1 + k^2) \quad (9)$$

Неравенство Кантелли справедливо для произвольного распределения с конечными первым и вторым моментами. Рассматривая множество активных операций $O(t)$ с параметрами $\mu_\Phi(t)$ и $\sigma_\Phi(t)$, применяем неравенство (9) к условию попадания в $K(t)$ по критерию отклонения: $\|\Phi\| - \mu_\Phi \geq \beta \cdot \sigma_\Phi$. При $k = \beta = 1,5$ вычисляем верхнюю границу для доли операций, удовлетворяющих этому условию:

$$P(\|\Phi\| - \mu_\Phi \geq 1,5 \cdot \sigma_\Phi) \leq 1/(1 + 1,5^2) \approx 0,308$$

Оценка является непараметрической — не требует предположений о виде распределения $\|\Phi\|$, справедлива для любого распределения с конечными первым и вторым моментами. Это существенно для практических данных, поскольку распределение отклонений в реальных строительных проектах, как правило, отличается от нормального и неизвестно априори. \square

Эмпирическая проверка.

Выполненный автором расчетный анализ распределения $\|\Phi\|$ на данных 396 дней строительства Курской АЭС-2 подтвердил отклонение от нормального распределения:

- Коэффициент асимметрии $\gamma_1 = 2,34$ (значительный правый хвост — операции с большими отклонениями встречаются чаще, чем предсказывает нормальное распределение);

- Коэффициент эксцесса $\kappa = 4,2$ (тяжёлые хвосты — экстремальные отклонения более вероятны, чем при нормальном распределении);

- Тест Шапиро-Уилка: $p < 0,001$ (гипотеза нормальности отвергнута на уровне значимости 0,001).

Интересный результат показал расчетный контроль отклонений на эмпирических данных для Курской АЭС. Мгновенная статистика: Средняя доля операций с $\|\Phi\| \geq \theta(t)$ в отдельно взятый момент времени составила $\sim 7\%$ от числа активных операций $|O(t)|$, что значительно ниже теоретической границы 30,8% и подтверждает консервативность непараметрической оценки Леммы 1. Интегральная статистика: За 396 дней эксплуатации системы в множество $K(t)$ хотя бы один раз попали 1 053

уникальных операции (7,1% от общего числа 14 872 операций сетевого графика), при этом средний размер $|K(t)|$ в отдельно взятый момент времени зависел от фазы проекта и числа активных операций $O(t)$.

Интерпретация: Теоретическая граница 30,8% гарантирует, что даже в наихудшем случае (при любом распределении отклонений) доля операций, попадающих в $K(t)$ по критерию отклонения, не превысит трети от числа активных операций. На практике в проведенном расчетном эксперименте экономичность подхода была заметно выше. Благодаря адаптивности порога $\theta(t)$, фактическая доля стабилизируется на уровне $\sim 7\%$, обеспечивая практическую когнитивную управляемость множества $K(t)$ для лиц, принимающих решения.

Замечание о полном размере $K(t)$: Операции, попадающие в $K(t)$ по критериям $TF \leq 5$ дней или $csl \leq 2$, учитываются дополнительно к критерию отклонения. Это обеспечивает безусловное включение операций критического пути и классов безопасности CSL 1–2 независимо от величины текущих отклонений.

Верификация степенной зависимости: Эмпирический анализ зависимости размера множества $|K(t)|$ от порога θ на 38 016 циклах показал степенной характер:

$$|K(t)| = 42,1 \cdot \theta^{-1,72}, R^2 = 0,997 \quad (10)$$

Показатель степени $-1,72$ согласуется с теоретическим предсказанием для распределений с тяжёлыми хвостами. Высокое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,997$ подтверждает адекватность степенной модели и предсказуемость поведения фильтра при различных значениях чувствительности β .

В. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Лемма 2 (о вычислительной сложности).

Формирование множества $K(t)$ для N активных операций имеет вычислительную сложность $O(N \log N)$.

Доказательство (конструктивное).

Algorithm 1 состоит из следующих этапов с соответствующей вычислительной сложностью:

Этап 1 (строки 2–6): Вычисление вектора отклонений $\Phi(o_i)$ для каждой операции $o_i \in O(t)$. Вычисление компонент φ_T , φ_C требует $O(1)$ операций (чтение данных из сетевого графика и финансового учёта), вычисление φ_R — $O(m)$ операций (максимум по m типам ресурсов). Суммарная сложность для всех N операций: $O(N \cdot m)$.

Этап 2 (строки 9–11): Вычисление статистик μ_Φ и σ_Φ . Среднее μ_Φ требует однократного прохода по N значениям $|\Phi|$: $O(N)$. Стандартное отклонение σ_Φ вычисляется за один проход с использованием формулы $\sigma^2 = E[X^2] - (E[X])^2$: $O(N)$. Вычисление порога θ : $O(1)$. Суммарно: $O(N)$.

Этап 3 (строки 15–17): Проверка условий включения в $K(t)$ для каждой операции. Проверка $\|\Phi(o_i)\| > \theta$, получение $TF(o_i)$ и $csl(o_i)$: $O(1)$ на операцию. Добавление в множество K : $O(1)$ при реализации через хеш-таблицу. Суммарно для всех операций: $O(N)$.

Этап 4 (опциональный): Если требуется упорядочить $K(t)$ по убыванию $|\Phi|$ для приоритезации при

обсуждении на совещании, выполняется сортировка множества K размером $|K|$: $O(|K| \log |K|)$. В худшем случае $|K| = N$ (все операции попали в K), что даёт $O(N \log N)$.

Суммарная сложность:

$$T(N) = O(N \cdot m) + O(N) + O(N) + O(|K| \log |K|) = O(N \cdot m + |K| \log |K|) = O(N \log N),$$

при $m = \text{const}$ и $|K| \leq N$

В типичных условиях эксплуатации размер $|K(t)|$ составляет небольшую долю от $|O(t)|$ (эмпирически наблюдалось $|K(t)| \approx 5 - 15\%$ в зависимости от фазы проекта), и при отсутствии сортировки сложность составляет $O(N)$. Таким образом, метод обеспечивает линейную сложность $O(N)$ в типичном случае и логлинейную $O(N \log N)$ в худшем случае. □

Экспериментальная верификация.

Измерения выполнены на реальных данных Курской АЭС-2 с использованием следующей конфигурации:

- Реализация: Python 3.10 с использованием PostgreSQL для хранения и обработки данных DSS(t);
- Аппаратура: Сервер с процессором Intel Xeon Silver 4214R (базовая частота 2,4 ГГц).

За 396 дней эксплуатации системы выполнено множество циклов формирования $K(t)$ для различных размеров активного множества $O(t)$ в зависимости от фазы проекта. Время выполнения Algorithm 1 для сетевого графика размером $N = 14\,872$ операций составило менее 0,1 секунды, что подтверждает применимость метода для оперативного управления в режиме, близком к реальному времени.

Наблюдаемая зависимость времени выполнения от размера активного множества $O(t)$ соответствует теоретической оценке $O(N \log N)$, что подтверждает корректность асимптотического анализа и эффективность практической реализации.

Таблица 3. Сравнение с базовым подходом управления

Показатель	Базовый подход (ручное управление)	Адаптивный фильтр	Улучшение
Обнаружение критических отклонений CSL 1-2 (Recall)	$\approx 85\%$ (экспертная оценка)	99,8%	+14,8 п.п.
Точность отбора ключевых событий (Precision)	Не формализовано	94,5%	Формализация
Среднее время обнаружения отклонения	12–24 часа	15 минут	в 48–96 раз
Формирование множества ключевых событий	Не формализовано	1 053 операции (7,1%)	Управляемый размер

Показатель	Базовый подход (ручное управление)	Адаптивный фильтр	Улучшение
Наличие аудиторского следа решений	< 30%	100%	+70 п.п.

С. СРАВНЕНИЕ С БАЗОВЫМ ПОДХОДОМ

Для оценки эффективности разработанного метода проведено сравнение с базовым подходом — ручным управлением без автоматизированной фильтрации ключевых событий, применявшимся на аналогичных проектах строительства АЭС.

Методика сравнения: на основе ретроспективного анализа оперативных журналов и экспертных оценок (панель из 5 специалистов с опытом управления строительством АЭС 15+ лет каждый) реконструированы характеристики базового подхода. Характеристики предложенного метода получены по фактическим данным 396 дней эксплуатации системы на Курской АЭС-2.

Анализ результатов:

1. Полнота обнаружения: Адаптивный фильтр обеспечивает $Recall = 99,8\%$ для операций классов безопасности CSL 1–2, что на 14,8 процентных пункта выше базового подхода. Экспертная комиссия зафиксировала 4 127 случаев, когда операции классов безопасности CSL 1–2 находились в критичном состоянии (требовали управленческого вмешательства согласно экспертной оценке). Из них метод пропустил только 8 случаев ($Recall = 99,8\%$), причём все 8 пропущенных операций были завершены в срок по факту (отклонения были скомпенсированы в ходе выполнения), что подтверждает консервативность экспертной разметки.

2. Точность фильтрации: $Precision = 94,5\%$ означает, что 94,5% операций, включённых в $K(t)$, действительно требовали управленческого внимания согласно экспертной оценке. Базовый подход не имел формализованного механизма отбора ключевых событий — решения принимались на основе неструктурированной информации из множества источников (устные доклады, оперативные совещания, журналы производства работ).

3. Своевременность обнаружения: Автоматизированная фильтрация на основе данных $DSS(t)$ сокращает время обнаружения отклонений с 12–24 часов (типичный интервал между оперативными совещаниями в базовом подходе) до 15 минут (период обновления данных мониторинга), что создаёт временной запас для принятия корректирующих мер.

4. Управляемость: Формирование явного множества $K(t)$ размером 1 053 операции (7,1% от общего числа) обеспечивает когнитивную управляемость для лиц, принимающих решения. В базовом подходе отсутствовала формализованная процедура выделения подмножества операций, требующих приоритетного внимания, что приводило либо к информационной перегрузке (попытка охватить все активные операции),

либо к субъективному отбору с риском пропуска критических ситуаций.

5. Прослеживаемость решений: Формализация критериев включения в $K(t)$ (формула 8) обеспечивает полную прослеживаемость: для каждой операции документируется, по какому именно критерию ($\|\Phi\| > \theta$, $TF \leq 5$, или $csl \leq 2$) она попала в множество ключевых событий, что критично для аудита безопасности атомных проектов.

Ограничения сравнения: Базовый подход реконструирован ретроспективно на основе экспертных оценок, поскольку прямое сравнение (контрольная группа без автоматизированной фильтрации на том же проекте) было невозможно по соображениям безопасности и организационной целесообразности. Оценка $Recall \approx 85\%$ для базового подхода получена на основе ретроспективного анализа исторических данных аналогичных проектов строительства АЭС третьего поколения с учётом частоты пропущенных критических событий, зафиксированных в отчётах по отклонениям.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

А. ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Верификация метода трёхмерной фильтрации выполнена на реальных данных строительства энергоблока №1 Курской АЭС-2 (реакторная установка ВВЭР-ТОИ мощностью 1255 МВт).

Сетевой график: Oracle Primavera P6, формат XER, 14872 операции, охватывающие полный цикл строительства от подготовительных работ до пусконаладки. Операции классифицированы по классам безопасности согласно градуированному подходу МАГАТЭ [25]: операции классов безопасности CSL 1–2 (системы безопасности и системы, важные для безопасности) составляют приоритетную группу для верификации полноты фильтрации.

Период наблюдений: 396 дней непрерывной эксплуатации системы мониторинга, охватывающие различные фазы проекта: подготовительные и земляные работы, строительно-монтажные работы, пусконаладочные работы.

Объём данных мониторинга: более 1,2 миллиарда записей, суммарный объём 979 ГБ, источники данных:

Персонал (P(t)): Системы геопозиционирования PoT (RFID/UWB), СКУД, табельный учёт;

Оборудование и работы (E(t)): Primavera P6 (ежедневная актуализация статуса операций), акты КС-2/КС-3 (фактические затраты), журналы производства работ;

Ресурсы (R(t)): 1С:ERP (складской учёт материалов, заявки на поставку), телематика строительной техники, диспетчеризация энергоснабжения;

Метрики (M(t)): Аналитические витрины данных, KPI подрядчиков, видеоаналитика.

Экспертная разметка: для верификации метрик $Recall$ и $Precision$ сформирована панель из 5 экспертов (главный инженер проекта, 2 руководителя направлений СМР, 2 специалиста по ПНР, суммарный опыт управления строительством АЭС 87 лет). На контрольной выборке из

30 дней (случайная выборка, охватывающая различные фазы проекта) эксперты независимо классифицировали операции как «требующие управленческого внимания» / «не требующие внимания». Операция считалась действительно проблемной, если её отметили не менее 3 из 5 экспертов (порог согласия 60%).

В. РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЛЬТРАЦИИ

За 396 дней эксплуатации системы выполнено 38 016 циклов формирования множества $K(t)$ (частота обновления данных мониторинга обеспечивала регулярное обновление множества ключевых событий).

Итоговая редукция информационного потока:

За весь период наблюдений в множество $K(t)$ хотя бы один раз попали 1 053 уникальных операции (7,1% от общего числа 14 872 операций сетевого графика). Это означает, что метод сконцентрировал управленческое внимание на 7,1% операций, обеспечив при этом высокую полноту обнаружения критических отклонений.

Качество фильтрации:

Верификация метрик качества выполнена на контрольной выборке (30 дней, экспертная разметка) путём сравнения множества $K(t)$, сформированного методом, с множеством операций, отмеченных экспертами как требующие управленческого внимания.

Таблица 4. Метрики качества фильтрации (на контрольной выборке 30 дней)

Метрика	Все операции	CSL 1–2
Recall (полнота)	99,30%	99,80%
Precision (точность)	94,50%	94,50%
F1-score	96,80%	97,10%

Интерпретация результатов:

Для операций CSL 1–2 (критерий безопасности) метод обеспечивает $Recall = 99,8\%$, что превышает заданное требование $\geq 95\%$. Экспертная комиссия зафиксировала 4 127 случаев, когда операции классов безопасности CSL 1–2 находились в критичном состоянии (требовали управленческого вмешательства согласно экспертной оценке). Из них метод пропустил только 8 случаев ($Recall = 99,8\%$), причём все 8 пропущенных операций были завершены в срок по факту (отклонения были скомпенсированы в ходе выполнения), что подтверждает консервативность экспертной разметки.

$Precision = 94,5\%$ означает, что 94,5% операций, включённых в $K(t)$, действительно требовали управленческого внимания согласно экспертной оценке. Ложные срабатывания (5,5%) в основном были связаны с операциями, имевшими кратковременные отклонения, которые были скомпенсированы без явного управленческого вмешательства.

$F_1 - score = 97,1\%$ для CSL 1–2 демонстрирует сбалансированность метода — высокую полноту при сохранении приемлемой точности.

Анализ пропусков (False Negative). Детальный анализ

127 ложноотрицательных случаев (операции, пропущенные фильтром, но требовавшие внимания согласно экспертам) выявил следующие причины:

84 случая (66,1%) — данные IoT или видеоаналитики поступили с задержкой > 30 минут, что привело к задержке включения операции в $K(t)$;

31 случай (24,4%) — отклонение по компоненте φ_R было вызвано кратковременным перемещением бригады (< 2 часа), которое фильтр не зафиксировал из-за интервала агрегации данных;

12 случаев (9,4%) — ошибки в данных Primavera (некорректные связи зависимостей в сетевом графике).

Таким образом, 90,6% пропусков обусловлены качеством и актуальностью исходных данных $DSS(t)$, а не недостатками метода фильтрации.

С. ВЕРИФИКАЦИЯ СТЕПЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Эмпирический анализ зависимости размера множества $|K(t)|$ от порога θ на 38 016 циклах показал степенной характер, подтверждающий теоретическую модель $|K(t)| = 42,1 \cdot \theta^{-1,72}$, $R^2 = 0,997$ (формула 10, раздел III.A).

Интерпретация:

Показатель степени $-1,72$ согласуется с теоретическим предсказанием для распределений с тяжёлыми хвостами (асимметрия $\gamma_1 = 2,34$, эксцесс $\kappa = 4,2$);

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,997$ указывает на высокую предсказательную силу модели — изменение порога θ позволяет надёжно прогнозировать размер множества $K(t)$;

Практическое значение: Лица, принимающие решения, могут регулировать чувствительность системы изменением параметра β в формуле $\theta(t) = \mu_\Phi(t) + \beta \cdot \sigma_\Phi(t)$, контролируя баланс между полнотой обнаружения и размером множества $K(t)$.

Монотонность: Анализ всех 38 016 циклов подтвердил строгую монотонность — размер $|K(t)|$ убывает с ростом порога θ без исключений, что верифицирует теоретическое свойство метода.

Д. СРАВНЕНИЕ С БАЗОВЫМ ПОДХОДОМ

Как показано в разделе III.C (Таблица 3), метод обеспечивает следующие улучшения по сравнению с базовым подходом (ручное управление без автоматизированной фильтрации):

Полнота обнаружения: $Recall = 99,8\%$ для CSL 1–2 против $\approx 85\%$ в базовом подходе (+14,8 процентных пункта);

Своевременность: Среднее время обнаружения отклонения сокращено с 12–24 часов до 15 минут (в 48–96 раз);

Прослеживаемость: Формализация критериев включения в $K(t)$ обеспечивает 100% наличие аудиторского следа решений против $< 30\%$ в базовом подходе.

Практическая значимость: Формирование компактного множества $K(t)$ размером 1 053 операции (7,1% от общего графика) вместо необходимости мониторить все 14 872 операции обеспечивает когнитивную управляемость процесса принятия

решений. Это позволяет лицам, принимающим решения, сконцентрировать внимание на действительно критичных операциях, снижая риск информационной перегрузки и пропуска важных событий.

Е. ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА

Экспериментальная верификация и анализ ее результатов выявила ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов и применении метода к другим проектам.

1. Критерий $|\Phi| > \theta$ не различает структуру отклонений. Операции с одинаковой евклидовой нормой $|\Phi|$ могут иметь качественно различную природу проблемы. Например, операция с вектором отклонений $\Phi_1 = (0,60; 0,10; 0,10)$ имеет $\|\Phi_1\| \approx 0,62$ и характеризуется одномерной проблемой (критический дефицит одного типа ресурса при нормальных затратах и сроках), тогда как операция с вектором $\Phi_2 = (0,35; 0,35; 0,35)$ имеет $\|\Phi_2\| \approx 0,61$ и сигнализирует о системной проблеме (одновременные отклонения по срокам, затратам и ресурсам). Текущая реализация метода присваивает им практически одинаковый приоритет при упорядочении $K(t)$ по убыванию $|\Phi|$, хотя управленческие действия для них качественно различны.

Направление развития: Введение индекса комбинированности для ранжирования операций внутри $K(t)$ с учётом структуры вектора отклонений. Операции с высокой комбинированностью (равномерное распределение отклонений по всем трём компонентам) требуют приоритетного внимания как индикаторы системных проблем.

2. Зависимость от полноты и качества данных $DSS(t)$. Метод предполагает наличие актуальных данных о плановых и фактических значениях для вычисления компонент вектора Φ . Анализ причин пропусков (раздел IV.B) показал, что 90,6% ложноотрицательных случаев обусловлены проблемами качества данных, именно:

- Задержка поступления данных от систем ИТ и видеоаналитики (> 30 минут);
- Кратковременные флуктуации в данных о ресурсах, не отражающие устойчивые отклонения;
- Ошибки в данных сетевого графика (некорректные связи зависимостей, неактуализированные значения TF).

Таким образом, качество фильтрации напрямую зависит от дисциплины ведения данных участниками проекта и надёжности работы систем мониторинга.

3. Эмпирическая верификация на одной площадке.

Все результаты получены на данных Курской АЭС-2. Переносимость на другие проекты зависит от:

- Сопоставимости организационно-технологического контура (тип реактора, подрядная модель, зрелость цифровой инфраструктуры);
- Калибровки параметра β под специфику проекта (значение $\beta = 1,5$ оптимально для Курской АЭС-2, но может требовать адаптации для проектов с иным распределением отклонений);
- Наличия цифрового контура мониторинга, обеспечивающего данные $DSS(t)$ требуемой полноты и актуальности.

Верификация на данных других проектов строительства

АЭС (как отечественных, так и международных) является направлением дальнейших исследований и необходима для подтверждения универсальности метода.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты настоящей работы

В статье разработан и экспериментально верифицирован метод трёхмерной фильтрации ключевых событий для управления строительством крупных технологически сложных объектов на примере атомных электростанций. Сформулируем ключевые результаты работы:

1. Интегрированный критерий фильтрации. Предложен трёхмерный вектор отклонений $\Phi = \langle \varphi_T, \varphi_C, \varphi_R \rangle$, объединяющий временные (СРМ), стоимостные (EVM) и ресурсные измерения в единую метрику. В отличие от существующих одномерных подходов, метод выявляет операции с комплексными отклонениями, которые могут быть пропущены при отдельном анализе сроков, затрат и ресурсов.

2. Адаптивный порог $\theta(t) = \mu \cdot \Phi(t) + \beta \cdot \sigma \cdot \Phi(t)$. Разработан механизм автоматической подстройки порога фильтрации под текущее распределение отклонений, обеспечивающий стабильный размер множества ключевых событий $K(t)$ независимо от фазы проекта. Доказано (Лемма 1), что доля операций с $\|\Phi\| \geq \theta(t)$ не превышает 30,8% при любом распределении отклонений (непараметрическая оценка на основе неравенства Кантелли [27]). Эмпирически фактическая доля составила ~7%, что подтверждает консервативность теоретической границы.

3. Вычислительная эффективность. Доказано, что формирование $K(t)$ для N активных операций имеет сложность $O(N \log N)$. Экспериментально подтверждено на сетевом графике $N = 14\ 872$: время выполнения < 0,1 секунды, что обеспечивает применимость для оперативного управления в режиме, близком к реальному времени.

4. Редукция информационного потока. На данных 396 дней строительства Курской АЭС-2 достигнута редукция с 14 872 операций до 1 053 уникальных ключевых событий (7,1%), при этом полнота обнаружения критических отклонений для операций классов безопасности CSL 1–2 составила $Recall = 99,8\%$ (превышает требование $\geq 95\%$), точность $Precision = 94,5\%$, $F_1 - score = 97,1\%$.

5. Улучшение относительно базового подхода. Сравнение с ручным управлением (ретроспективный анализ, экспертные оценки) показало улучшение полноты обнаружения на 14,8 процентных пункта, сокращение времени обнаружения отклонений в 48–96 раз (с 12–24 часов до 15 минут), обеспечение 100% прослеживаемости решений (+70 п.п. относительно базового подхода).

Сформулируем явно новизну предлагаемых подходов. Предложено использовать трёхмерный критерий отклонений вместо одномерных (СРМ анализирует только сроки, EVM — только затраты, ресурсный анализ

— только обеспеченность). Интеграция трёх измерений в единую метрику $|\Phi|$ позволяет выявлять комплексные проблемы, невидимые для отдельного анализа. Критерий реализует редукция размерности ресурсного пространства. Использование принципа "узкого места" (максимум относительного дефицита по типам ресурсов) в компоненте φ_R обеспечивает редукцию с $(2 + m)$ измерений (время, стоимость, m типов ресурсов) к трём, сохраняя при этом информацию о наиболее критичном дефиците. В целях учета специфики атомной отрасли предложена интеграция класса безопасности (CSL) в критерий включения в $K(t)$. Рассмотрен градуированный подход МАГАТЭ [25,26] по классам безопасности: операции 1–2 класса безопасности включаются безусловно независимо от величины отклонений, что соответствует принципу "глубокоэшелонированной защиты" (defence in depth).

Введен адаптивный порог отнесение текущих событий в группу повышенного внимания контура управления для всего цикла сооружения и оценена эффективность отбора по этому критерию. В отличие от статических правил отбора (top-N операций, фиксированный порог $\theta = \text{const}$), предложенный адаптивный механизм $\theta(t) = \mu_{\Phi}(t) + \beta \cdot \sigma_{\Phi}(t)$ автоматически подстраивается под изменяющееся распределение отклонений. Доказана непараметрическая гарантия ограниченности размера $K(t)$ (Лемма 1).

Представленная работа не ограничивается теоретической проработками. Метод реализован в виде программного обеспечения и внедрён на строительной площадке Курской АЭС-2:

- 396 дней непрерывной эксплуатации;
- 38 016 циклов формирования множества $K(t)$;
- Обработка 1,2 миллиарда записей данных мониторинга (979 ГБ);
- Формирование 1 053 ключевых событий (редукция на 92,9% относительно полного графика).

Метод может быть распространён на другие отрасли капитального строительства и применим к крупным строительным проектам с сетевыми графиками $N > 500$ операций, требующими интеграции данных из множества источников (календарно-сетевое планирование, финансовый учёт, ресурсное обеспечение). Адаптация к конкретному проекту требует:

- Калибровки параметра β по критерию максимизации F1-score на контрольной выборке с экспертной разметкой;
- Определения порогового значения TF_{thr} для критерия критического пути (рекомендуется $TF_{thr} = 5 - 10$ рабочих дней в зависимости от длительности проекта);
- Обеспечения цифрового контура мониторинга, предоставляющего данные $DSS(t)$ требуемой полноты и актуальности.

Для повышения эффективности управления крупными проектами сооружения сложных инженерных объектов авторами планируется в последующих исследованиях расширить подход и учесть ряд идей и соображений. Анализ теоретических результатов и экспериментальная

верификация метода на данных Курской АЭС-2 выявила ряд перспективных направлений развития, которые могут повысить эффективность фильтрации и расширить область применения подхода.

Как показано в разделе IV.E, текущая реализация метода не различает операции с одинаковой нормой $|\Phi|$, но качественно различной структурой проблемы. Перспективным направлением является введение индекса комбинированности для ранжирования операций внутри $K(t)$: операции с равномерным распределением отклонений по всем трём компонентам (системные проблемы) могут требовать приоритетного внимания по сравнению с одномерными отклонениями той же величины. Разработка такого индекса и его эмпирическая верификация на расширенной выборке проектов позволит уточнить приоритезацию управленческих действий.

Текущая оценка качества метода основана на метриках Recall и Precision, характеризующих полноту и точность обнаружения отклонений. Дополнительной задачей является количественная оценка эффективности корректирующих действий в зависимости от величины отклонения, времени реагирования и класса безопасности операции. Построение такой модели требует контролируемого эксперимента или квазиэкспериментального дизайна с сопоставлением исходов для операций с вмешательством и без него, что выходит за рамки настоящего исследования, но представляет значительный практический интерес.

Параметр $\beta = 1,5$ получен эмпирически на контрольной выборке из 30 дней. Автоматическая подстройка β на основе обратной связи от лиц, принимающих решения (методы активного обучения) позволит учитывать изменение приоритетов и условий в ходе проекта без необходимости периодической ручной рекалибровки. Исследование устойчивости такой адаптации к шуму в экспертных оценках и разработка критериев остановки обучения являются отдельными методическими задачами.

Все результаты получены на данных одного проекта (Курская АЭС-2, ВВЭР-ТОИ). Проверка метода на данных проектов с другими типами реакторов, организационными моделями и уровнями зрелости цифровой инфраструктуры необходима для подтверждения универсальности подхода. Особый интерес представляет сопоставление с международными данными строительства АЭС третьего поколения [17, 18, 28] что позволит выявить культурно-организационные факторы, влияющие на эффективность автоматизированной фильтрации.

Текущая реализация метода является реактивной — операция включается в $K(t)$ после возникновения фактического отклонения. Переход к проактивному управлению возможен через интеграцию метода фильтрации с прогнозными моделями (регрессионные модели, временные ряды, методы машинного обучения), выявляющими операции с высокой вероятностью перехода в критическое состояние до фактического возникновения отклонений. Построение таких моделей требует накопления достаточного объёма исторических

данных по множеству проектов для обеспечения обобщающей способности предиктора.

Расширение области применения. Метод разработан для строительства АЭС, но базовые принципы (интеграция разнородных измерений, адаптивный порог, безусловное включение критичных объектов) применимы к другим классам крупных инженерных проектов: нефтегазовое строительство, транспортная инфраструктура, промышленные комплексы. Адаптация метода к специфике других отраслей (определение релевантных компонент вектора Φ , калибровка параметров, формализация критериев критичности) может расширить практическую значимость подхода.

Сформулируем кратко итоги настоящего исследования работы.

Метод трёхмерной фильтрации ключевых событий с адаптивным порогом решает критическую проблему информационной перегрузки при управлении крупными строительными проектами. Редукция информационного потока с 14 872 операций до 1 053 ключевых событий (92,9%) при сохранении полноты обнаружения критических отклонений (Recall = 99,8% для операций классов безопасности CSL 1–2) подтверждает практическую применимость подхода. Непараметрическая теоретическая гарантия ограниченности размера $K(t)$ (не более 30,8% активных операций при любом распределении отклонений) обеспечивает предсказуемость метода и позволяет с уверенностью внедрять его на критически важных объектах, где цена ошибки — безопасность и миллиарды рублей перерасхода. Опыт эксплуатации в течение 396 дней на Курской АЭС-2 демонстрирует, что автоматизированная фильтрация не только снижает когнитивную нагрузку на лиц, принимающих решения, но и обеспечивает формализацию и прослеживаемость решений — критически важное требование для аудита безопасности атомных проектов. Дальнейшее развитие метода в направлении учёта структуры отклонений и проактивного управления рисками открывает перспективы создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений нового поколения для управления мегапроектами.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Michael Grieves Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. // Cham: Springer International Publishing — 2023, 228 p.
- [2] Макаров Н. В. Применение технологий BIM в управлении строительными проектами: преимущества и вызовы // Journal of Monetary Economics and Management – 2024, №9, p. 319-323, DOI 10.26118/2782-4586.2024.38.71.065
- [3] Интеллектуальные платформы интеграции технологий BIM и цифровых двойников, обеспечивающие функционирование инженерной инфраструктуры фабрик будущего // Национальный центр мирового уровня «Передовые цифровые технологии» — 2020, URL: https://ncmu.spbstu.ru/ncmu_projects/13 (дата обращения: 25.05.2026).
- [4] Zhabitskii M.G., Melnikov V.E., Boyko O.V. Complex engineering object digital twins - power engineering smart transformation basic concept // В сборнике: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. The II "International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy" — Voronezh, 2021. p. 12050
- [5] Song J., Martens A., Vanhoucke M. Using Schedule Risk Analysis with Resource Constraints for Project Control // European Journal of Operational Research — 2020, Vol. 288, No. 3. DOI:10.1016/j.ejor.2020.06.015
- [6] Kong F., Dou D. Resource-Constrained Project Scheduling Problem under Multiple Time Constraints // Journal of Construction Engineering and Management — 2021, Vol. 6. No. 3. p. 141–156, DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001990
- [7] Satic U., Jacko P., Kirkbride C. A Simulation-Based Approximate Dynamic Programming Approach to Dynamic and Stochastic Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem // European Journal of Operational Research. 2024. Vol. 315, No. 2. P. 454–469. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.10.046
- [8] Atena Khoshkonesh, Mohsen Mohammadagha, Navid Ebrahimi Integrated 4D/5D Digital-Twin Framework for Cost Estimation and Probabilistic Schedule Control: A Texas Mid-Rise Case Study. Simulation-Based Validation of an Integrated 4D/5D Digital-Twin Framework for Predictive Construction Control. // arXiv preprint. — 2025, arXiv:2511.15711 & 2511.03684.
- [9] Vanhoucke M., Coelho J. An Analysis of Network and Resource Indicators for Resource-Constrained Project Scheduling Problem Instances // Computers & Operations Research. 2021. Vol. 132. Article 105260. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105260
- [10] Коныхов В.В., Широков В.И., Жабицкий М.Г. Прогнозирование срывов сроков строительства с использованием машинного обучения на основе исторических данных о фактической продолжительности завершённых проектов // International Journal of Open Information Technologies — 2024. Vol. 12, No 8. p. 35-47.
- [11] Екимовская В.А., Жабицкий М.Г. Разработка системы для цифрового инженерно-строительного контроля с возможностью валидации текущего состояния по отношению к проектному на основе объективных визуальных данных // International Journal of Open Information Technologies — 2024. Vol. 12, No 8. p. 76-83.
- [12] Екимовская В.А., Барсуков И.А., Екименко А.А., Литвин С.Л., Соцкий А.И., Жабицкий М.Г. Концепция использования онтологической модели в атомной энергетике для управления жизненным циклом сложным инженерным объектом на этапе строительства International // Journal of Open Information Technologies — 2025. vol. 13, no 8. С. 28-40
- [13] Боридько С.И., Клятецкий С.А. Предпосылки создания единой автоматизированной системы управления предприятием (АЭС) на всех стадиях жизненного цикла: от строительства до вывода из эксплуатации // International Journal of Open Information Technologies — 2025, Vol. 13, No. 6, p.
- [14] Nuclear Power Plant Construction: What Can Be Learned from Past and Current Projects: // IAEA-TECDOC-1651. Vienna: IAEA — 2010, 124 p.
- [15] Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W. Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition. — Cambridge : Cambridge University Press, 2003. — 218 p. ISBN 978-0-521-80420-3
- [16] Locatelli G., Mancini M., Bingham C. Nuclear Power Plant Construction: A Review of Recent Trends and Issues // Energy Policy. 2014. Vol. 73. P. 75–85. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.05.015
- [17] Ruuska, I., Ahola, T., Artto, K., Eloranta, K., & Kärki, P. (2011). A new governance approach for multi-firm projects: Lessons from Olkiluoto 3 and Flamanville 3 nuclear power plant projects. International Journal of Project Management, 29(4), 355–366 <https://doi.org/10.1016/j.ijproman>.
- [18] U.S. Government Accountability Office. Nuclear Power: Status of Vogtle Units 3 and 4. GAO-21-28. Washington, DC: U.S. Government Accountability Office, 2020. 58 p.
- [19] Kelley J.E., Walker M.R. Critical-Path Planning and Scheduling // Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference —, 1959, p. 160–173, <https://doi.org/10.1145/1460299.1460318>.
- [20] Fleming Q.W., Koppelman J.M. Earned Value Project Management. 4th ed. // Newtown Square, PA: Project Management Institute (PMI), 2010. 231 p. ISBN 978-1-935589-08-2.
- [21] Mao, W. (2017). Earned Value Management for China AP1000/CAP1400 Nuclear Power Plant Construction Projects. In: Jiang, H. (eds) Proceedings of The 20th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC 2016). Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-10-2311-8_82.
- [22] Vanhoucke M. Integrated Project Management and Control: Managing Complex Projects and Risks. — Springer, 2014. — 288 p. DOI: 10.1007/978-3-319-04330-2
- [23] Lipke W. Earned Schedule — 10 Years After // The Measurable News. 2013. Issue 3. P. 15–21.
- [24] Lipke W., Zwikael O., Henderson K., Anbari F. Prediction of project outcome: the application of statistical methods to earned value management and earned schedule performance indexes // International Journal of Project Management. — 2009, Vol.27, No.4, p.400–407. DOI: 10.1016/j.ijproman.2008.02.009
- [25] International Atomic Energy Agency. Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. SSG-52. Vienna: IAEA, 2019. 62 p. DOI 10.61092/IAEA.SSG-52.EN ISBN 978-92-0-102918-3

- [26] Leadership and Management for Safety // IAEA Safety Standards Series, Vienna, IAEA — 2016, No. GSR Part 2, 36 p. DOI10.61092/iaea.cq1k-j5z3
- [27] Ширяев А.Н. Вероятность-1, 4-е изд. // М., МЦНМО — 2011, 520 p.
- [28] EDF Energy. Hinkley Point C Digital Construction Update. Bristol, EDF — 2023.

Adaptive Three-Dimensional Key Event Filtering Method for Complex Engineering Construction Management Systems

S.A. Klyatetskii

Abstract— The paper addresses the problem of managing the construction of complex engineering facilities under continuously growing volumes of digital data generated by scheduling systems, ERP platforms, IIoT monitoring, construction equipment telemetry, and work progress accounting systems. Using the construction of Kursk NPP-2 as a case study, it is shown that existing project control methods, including the Critical Path Method (CPM), Earned Value Management (EVM), and conventional resource analysis, fail to provide comprehensive detection of critical deviations because they analyze schedule, cost, and resource parameters separately.

A three-dimensional key-event filtering method is proposed, integrating deviations in schedule, cost, and resource availability into a unified operation state vector. To identify operations requiring managerial attention, an adaptive filtering threshold is introduced that automatically adjusts to the current deviation distribution within the project. The method was implemented and experimentally verified using 396 days of real construction data from Kursk NPP-2, comprising more than 1.2 billion monitoring records. The results demonstrate that the proposed approach reduces the volume of monitored operations by 92.9% while maintaining a 99.8% recall rate for detecting critical deviations in safety-class operations CSL 1–2.

Keywords: construction management, nuclear power plants, digital twin, critical path method, earned value management, resource constraints, adaptive filtering.

REFERENCES

- [1] Michael Grieves Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. // Cham: Springer International Publishing —2023, 228 p.
- [2] Makarov N.V. Primenenie tekhnologii BIM v upravlenii stroitel'nyimi proektami: preimushchestva i vyzovy [Application of BIM Technologies in Construction Project Management: Benefits and Challenges]. Journal of Monetary Economics and Management. 2024;(9):319–323. DOI: 10.26118/2782-4586.2024.38.71.005
- [3] Intellektual'nye platformy integracii tekhnologij BIM i cifrovyyh dvoynikov, obespechivajushhie funkcionirovanie inzhenernoj infrastruktury fabrik budushhego // Nacional'nyj centr mirovogo urovnja «Peredovyye cifrovyye tekhnologii» — 2020, URL: https://ncmu.spbstu.ru/ncmu_projects/13 (data obrashhenija: 25.05.2026).
- [4] Zhabitskii M.G., Melnikov V.E., Boyko O.V. Complex engineering object digital twins - power engineering smart transformation basic concept // В сборнике: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. The II "International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy" — Voronezh, 2021. p. 12050
- [5] Song J., Martens A., Vanhoucke M. Using Schedule Risk Analysis with Resource Constraints for Project Control // European Journal of Operational Research — 2020, Vol. 288. No. 3. DOI:10.1016/j.ejor.2020.06.015
- [6] Kong F., Dou D. Resource-Constrained Project Scheduling Problem under Multiple Time Constraints // Journal of Construction Engineering and Management — 2021, Vol. 6. No. 3. p. 141–156, DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001990
- [7] Satic U., Jacko P., Kirkbride C. A Simulation-Based Approximate Dynamic Programming Approach to Dynamic and Stochastic Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem // European Journal of Operational Research. 2024. Vol. 315, No. 2. P. 454–469. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.10.046
- [8] Atena Khoshkonesh, Mohsen Mohammadagha, Navid Ebrahimi Integrated 4D/5D Digital-Twin Framework for Cost Estimation and Probabilistic Schedule Control: A Texas Mid-Rise Case Study. Simulation-Based Validation of an Integrated 4D/5D Digital-Twin Framework for Predictive Construction Control. // arXiv preprint. — 2025, arXiv:2511.15711 & 2511.03684.
- [9] Vanhoucke M., Coelho J. An Analysis of Network and Resource Indicators for Resource-Constrained Project Scheduling Problem Instances // Computers & Operations Research. 2021. Vol. 132. Article 105260. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105260
- [10] Konkov V.V., Shirokov V.I., Zhabitsky M.G. Predicting construction delays using machine learning based on historical data on the actual duration of completed projects // International Journal of Open Information Technologies — 2024. Vol. 12, No 8. p. 35-47.
- [11] Ekimovskaya V.A., Zhabitsky M.G. Development of a system for digital structural engineering control with the ability to validate the current state against the design state based on objective visual data // International Journal of Open Information Technologies — 2024. Vol. 12, No 8. p. 76-83.
- [12] Concept of the use of ontological model in nuclear power to manage the life cycle of a complex engineering object during the construction phase V.A. Ekimovskaya, I.A. Barsukov, A.A. Ekimenko, S.L. Litvin, A.I. Sotsky, M.G. Zhabitsky // Journal of Open Information Technologies — 2025. vol. 13, no 8. p. 28-40
- [13] Boridko S.I., Klyatetsky S.A. Prerequisites for the creation of a unified automated enterprise management system (NPP) for all life cycle stages: from construction to decommissioning // International Journal of Open Information Technologies — 2025, Vol. 13, No. 6, p.
- [14] Nuclear Power Plant Construction: What Can Be Learned from Past and Current Projects: // IAEA-TECDOC-1651. Vienna: IAEA — 2010, 124 p.
- [15] Flyvbjerg B., Bruzelius N., Rothengatter W. Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition. — Cambridge : Cambridge University Press, 2003. — 218 p. ISBN 978-0-521-80420-3
- [16] Locatelli G., Mancini M., Bingham C. Nuclear Power Plant Construction: A Review of Recent Trends and Issues // Energy Policy. 2014. Vol. 73. P. 75–85. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.05.015
- [17] Ruuska, I., Ahola, T., Artto, K., Eloranta, K., & Kärki, P. (2011). A new governance approach for multi-firm projects: Lessons from Olkiluoto 3 and Flamanville 3 nuclear power plant projects. International Journal of Project Management, 29(4), 355–366 <https://doi.org/10.1016/j.ijproman>.
- [18] U.S. Government Accountability Office. Nuclear Power: Status of Vogtle Units 3 and 4. GAO-21-28. Washington, DC: U.S. Government Accountability Office, 2020. 58 p.
- [19] Kelley J.E., Walker M.R. Critical-Path Planning and Scheduling // Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference —, 1959, p. 160–173, <https://doi.org/10.1145/1460299.1460318>.
- [20] Fleming Q.W., Koppelman J.M. Earned Value Project Management. 4th ed. // Newtown Square, PA: Project Management Institute (PMI), 2010. 231 p. ISBN 978-1-935589-08-2.
- [21] Mao, W. (2017). Earned Value Management for China AP1000/CAP1400 Nuclear Power Plant Construction Projects. In: Jiang, H. (eds) Proceedings of The 20th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC 2016). Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-10-2311-8_82.
- [22] Vanhoucke M. Integrated Project Management and Control: Managing Complex Projects and Risks. — Springer, 2014. — 288 p. DOI: 10.1007/978-3-319-04330-2
- [23] Lipke W. Earned Schedule — 10 Years After // The Measurable News. 2013. Issue 3. P. 15–21.
- [24] Lipke W., Zwiakael O., Henderson K., Anbari F. Prediction of project outcome: the application of statistical methods to earned value management and earned schedule performance indexes // International Journal of Project Management.—2009, Vol.27, No.4, p.400–407. DOI: 10.1016/j.ijproman.2008.02.009

[25] International Atomic Energy Agency. Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. SSG-52. Vienna: IAEA, 2019. 62 p. DOI 10.61092/IAEA.SSG-52.EN ISBN 978-92-0-102918-3

[26] Leadership and Management for Safety // IAEA Safety Standards Series, Vienna, IAEA — 2016, No. GSR Part 2, 36 p. DOI10.61092/iaea.cq1k-j5z3

[27] Shiryaev A.N. *Veroyatnost'-1* [Probability-1]. 4th ed. Moscow: Moscow Center for Continuous Mathematical Education, 2011. 520 p. [28] EDF Energy. Hinkley Point C Digital Construction Update. Bristol, EDF — 2023.

[28] EDF Energy. Hinkley Point C Digital Construction Update. Bristol, EDF — 2023.