

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

AUTOMATED SYSTEM FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF CAPITAL CONSTRUCTION FACILITIES BASED ON DIGITAL TECHNOLOGIES

M. Paramonov

Summary. This work is dedicated to developing an automated process control system (APCS) for comprehensive assessment of the technical condition of capital construction facilities based on modern digital technologies. The research includes creating an integrated software and hardware complex that combines Internet of Things (IoT) technologies, real-time monitoring systems, and predictive analytics methods. An automated system implementing the principles of a digital twin of a building using Building Information Modeling (BIM/TIM) technology is proposed. The developed APCS provides automation of data collection, processing, and analysis processes regarding the technical condition of buildings, enabling a transition from periodic maintenance to predictive maintenance and significantly improving the efficiency of facility lifecycle management.

Keywords: automated process control system, APCS, digital twin, IoT, technical condition monitoring, predictive analytics, BIM technologies.

Парамонов Максим Юрьевич

Аспирант,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
Dozor97-19@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) для комплексной оценки технического состояния объектов капитального строительства на основе современных цифровых технологий. Исследование включает создание интегрированного программно-технического комплекса, объединяющего технологии Интернета вещей (IoT), системы мониторинга в реальном времени и методы предиктивной аналитики. Предложена автоматизированная система, реализующая принципы цифрового двойника здания с использованием технологии информационного моделирования (BIM/TIM). Разработанная АСУТП обеспечивает автоматизацию процессов сбора, обработки и анализа данных о техническом состоянии зданий, что позволяет перейти от периодического обслуживания к прогнозируемому техническому обслуживанию и значительно повысить эффективность управления жизненным циклом объектов.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическими процессами, АСУТП, цифровой двойник, IoT, мониторинг технического состояния, предиктивная аналитика, BIM-технологии.

Введение

Современная строительная отрасль России переживает период масштабной цифровой трансформации, инициированной государственными программами развития и требованиями перехода к цифровой экономике. Согласно утвержденной Правительством РФ стратегии развития строительной отрасли до 2030 года, власти взяли курс на полную автоматизацию всех этапов строительства и эксплуатации объектов, что должно привести к кардинальному изменению подходов к управлению техническим состоянием зданий [1]. Этот амбициозный план затрагивает не только возведение новых объектов с применением передовых технологий, но и критически важную сферу управления техническим состоянием существующего жилищного фонда, составляющего миллиарды квадратных метров по всей стране. Традиционные методы периодических осмотров и субъективных экспертных заключений уже не способ-

ны обеспечить требуемый уровень безопасности и эффективности эксплуатации в условиях ужесточающихся нормативных требований. Более того, человеческий фактор при принятии решений о необходимости технического обслуживания часто приводит к серьезным ошибкам в планировании ремонтных работ, что влечет за собой как избыточные затраты ресурсов, так и повышенные риски возникновения аварийных ситуаций. В этих условиях создание эффективных автоматизированных систем управления становится не просто желательным направлением развития, а острой необходимостью для обеспечения безопасности жизнедеятельности населения и рационального использования бюджетных средств.

Революционные изменения в сфере цифровых технологий открывают беспрецедентные возможности для кардинального пересмотра подходов к мониторингу технического состояния зданий и сооружений. Развитие технологий промышленного интернета вещей (IIoT) по-

зволяет создавать распределенные сети высокоточных датчиков, способных в режиме реального времени отслеживать малейшие изменения в состоянии критически важных элементов строительных конструкций [2]. Современные беспроводные датчики деформации, температуры, влажности и вибрации обеспечивают непрерывный сбор данных без необходимости прокладки кабельных сетей, что значительно упрощает их установку на существующих объектах. Параллельно с этим стремительное развитие методов машинного обучения и искусственного интеллекта создает возможности для анализа больших массивов данных мониторинга и выявления скрытых закономерностей в изменении технического состояния зданий. Интеграция этих технологий в единые автоматизированные системы управления технологическими процессами открывает путь к принципиально новому уровню управления жизненным циклом объектов капитального строительства. Такой подход позволяет не только своевременно выявлять потенциальные проблемы, но и прогнозировать их развитие, оптимизировать планы технического обслуживания и минимизировать риски аварийных ситуаций.

Особую роль в современных условиях играет концепция цифрового двойника здания, которая представляет собой качественно новый подход к управлению недвижимостью и технической эксплуатацией объектов. Цифровой двойник — это не просто статичная трехмерная модель здания, созданная на этапе проектирования, а динамическая интеллектуальная система, способная в реальном времени моделировать поведение физического объекта на основе постоянно поступающих данных от множества датчиков и систем мониторинга [3]. Такая система позволяет проводить виртуальные эксперименты, моделировать различные сценарии развития событий и принимать обоснованные решения по техническому обслуживанию без риска для реального объекта. Интеграция цифрового двойника с технологиями информационного моделирования (BIM/ТИМ) создает мощную платформу для управления всем жизненным циклом здания — от проектирования до демонтажа. В России технология цифровых двойников пока находится на начальной стадии внедрения, однако уже существуют успешные пилотные проекты, демонстрирующие высокую эффективность такого подхода. Согласно исследованиям MarketsandMarkets, мировой рынок цифровых двойников достиг в 2020 году 3,1 млрд долларов и к 2026 году может вырасти до 48,2 млрд долларов, что свидетельствует о колоссальном потенциале этой технологии.

Нормативно-правовая база Российской Федерации активно адаптируется к требованиям цифровой трансформации строительной отрасли, создавая прочный фундамент для внедрения автоматизированных систем мониторинга. Ключевым событием стало введение в действие с 1 мая 2024 года нового ГОСТ 31937–2024

«Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», который заменил предыдущую версию стандарта и установил четкие требования к автоматизированному мониторингу различных категорий зданий [4]. Этот документ не только узаконил применение цифровых технологий в сфере технической эксплуатации, но и создал обязательные требования к автоматизированному мониторингу уникальных зданий и сооружений. Параллельно с этим Минстрой России утвердил национальный стандарт по технологиям информационного моделирования для жилых зданий, что создает единую методологическую базу для внедрения BIM-технологий на всех этапах жизненного цикла объектов. С июля 2024 года российские девелоперы обязаны использовать ТИМ-технологии при реализации проектов капитального строительства, что стимулирует развитие отечественных программных решений и создает предпосылки для массового внедрения цифровых двойников зданий. Эти нормативные изменения формируют благоприятную среду для развития автоматизированных систем управления техническим состоянием зданий и создают долгосрочные стимулы для инвестиций в цифровые технологии.

Анализ международного опыта показывает, что ведущие страны мира уже активно используют автоматизированные системы для управления техническим состоянием зданий, достигая значительных результатов в повышении эффективности эксплуатации и снижении аварийности. В Сингапуре, например, создана национальная система цифровых двойников зданий, охватывающая весь жилищный фонд города-государства и обеспечивающая автоматизированный мониторинг состояния конструкций с использованием более чем 50 тысяч IoT-датчиков различного типа. Великобритания реализует масштабную программу внедрения BIM-технологий во всех государственных строительных проектах, что позволило снизить стоимость эксплуатации зданий на 15–20 % и сократить время принятия решений по техническому обслуживанию в 3–4 раза. В США широко применяются системы предиктивной аналитики для прогнозирования отказов оборудования зданий, что позволяет переходить от планового к состоянию-ориентированному техническому обслуживанию с экономией до 30 % затрат на эксплуатацию. Однако прямое заимствование зарубежных решений для российских условий представляется невозможным из-за кардинальных различий в климатических условиях, конструктивных особенностях зданий, материалах конструкций и требованиях национальной нормативной базы. Российские здания эксплуатируются в значительно более суровых климатических условиях, что требует особого внимания к системам отопления, теплоизоляции и защиты от промерзания, а типовые конструктивные решения советского периода имеют специфические особенности, не характерные для зарубежного строительства.

Материалы и методы

Разработка автоматизированной системы управления технологическими процессами для комплексной оценки технического состояния зданий потребовала создания многоуровневой иерархической архитектуры, построенной в соответствии с принципами промышленной автоматизации и требованиями ГОСТ 34.003–90 «Автоматизированные системы. Термины и определения» [5]. Система спроектирована как трехуровневая пирамида управления, где каждый уровень выполняет специализированные функции и обеспечивает определенную степень автономности для повышения надежности и отказоустойчивости всего комплекса. Нижний полевой уровень включает в себя разнообразные датчики и исполнительные механизмы, размещенные непосредственно на контролируемых элементах здания: IoT-датчики деформации конструкций, температурно-влажностные сенсоры, акселерометры для измерения вибраций, инклинометры для контроля кренов и наклонов, а также интеллектуальные счетчики ресурсов с функциями диагностики состояния инженерных сетей. Средний контроллерный уровень реализован на базе промышленных программируемых логических контроллеров и промышленных компьютеров, обеспечивающих сбор данных от полевых устройств, их первичную обработку и передачу на верхний уровень управления. Верхний диспетчерский уровень представляет собой комплекс серверов и автоматизированных рабочих мест операторов, реализующих функции SCADA-системы, базы данных исторической информации, модули предиктивной аналитики и интерфейсы интеграции с внешними информационными системами предприятия.

Ключевым элементом разработанной системы стала математическая модель оценки технического состояния, основанная на иерархическом подходе к структурированию параметров мониторинга и их весовых коэффициентов. После тщательного анализа нормативных документов, включая СП 368.1325800.2017 и ВСН 53–86(р), а также изучения практического опыта эксплуатации зданий различных типов, была сформирована система из четырех укрупненных групп параметров, охватывающих все критически важные аспекты технического состояния объектов капитального строительства. Первая группа F1 «Инженерные системы» объединяет 21 параметр, характеризующий состояние систем жизнеобеспечения здания: горячего и холодного водоснабжения, отопления, вентиляции, канализации, газоснабжения, электроснабжения и пожаротушения, включая запорную арматуру и стояки всех систем. Вторая группа F2 «Архитектурные элементы» включает параметры состояния окон, отделочных покрытий помещений общего пользования и фасада здания. Третья группа F3 «Конструктивные элементы» охватывает наиболее критичные с точки зрения безопасности элементы: перекрытия, внутрен-

ние и несущие стены, двери, крышу и фундамент. Четвертая группа F4 «Эксплуатационные характеристики» учитывает такие факторы как год ввода в эксплуатацию, признание дома аварийным, общий износ здания, класс энергетической эффективности, состояние отопительных приборов и общее состояние дома.

Математическая формализация процесса оценки технического состояния основана на взвешенной сумме оценок групп параметров с учетом их относительной важности для безопасности эксплуатации здания. Комплексная оценка технического состояния здания W рассчитывается по формуле:

$$W = \sum_{j=1}^k A_j t_j$$

где A_j представляет весовой коэффициент j -ой группы параметров, определяемый экспертным путем с учетом региональных особенностей эксплуатации зданий, k — общее количество групп параметров, t_j — интегральная оценка текущего состояния j -ой группы параметров. Оценка состояния каждой группы параметров вычисляется как среднее арифметическое значение нормированных оценок входящих в нее отдельных параметров:

$$t_j = \sum_{i=1}^m w_{ij} / m$$

где m обозначает количество параметров, включенных в j -ую группу, а w_{ij} представляет коэффициент, характеризующий текущее состояние i -ого параметра j -ой группы. Значения коэффициентов w_{ij} нормированы в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует идеальному состоянию элемента, а 0 — критическому состоянию, требующему немедленного вмешательства.

Особое внимание при разработке математической модели было уделено учету временного фактора и физики процессов деградации строительных материалов и конструкций. Коэффициент состояния параметра w_{ij} определяется на основе нелинейной зависимости от времени эксплуатации элемента, учитывающей различные стадии жизненного цикла конструкций. Данная зависимость реализует трехзонную модель технического состояния: зона нормальной работоспособности (0–a), где техническое обслуживание не требуется и состояние элемента остается стабильным; зона ограниченной работоспособности (a–b), характеризующаяся постепенным ухудшением параметров и требующая планового технического обслуживания; критическая зона (>b), в которой работоспособность элемента приближается к нулю и требуется немедленное вмешательство для предотвращения аварийной ситуации. Границы зон определяются на основе нормативных требований, результатов натурных испытаний и статистического анализа данных эксплуатации аналогичных объектов. Такой подход позволяет автоматизированной системе не толь-

ко оценивать текущее состояние элементов, но и прогнозировать момент наступления критических состояний, оптимизируя планы технического обслуживания и минимизируя риски аварийных ситуаций.

Таблица 1.

Структура укрупненных групп параметров автоматизированной системы

Код	Название группы	Код параметра	Название параметра
F1	Инженерные системы	F1.1	Система ГВС
		F1.2	Вентиляция
		F1.3	Канализация
		F1.4	Газоснабжение
		F1.5	Система отопления
		F1.6	Запорная арматура системы ГВС
		F1.7	Запорная арматура системы отопления
		F1.8	Запорная арматура системы ХВС
		F1.9	Система водоотведения
		F1.10	Система водостоков
		F1.11	Система газоснабжения
		F1.12	Теплоснабжение
		F1.13	Система пожаротушения
		F1.14	Система ХВС
		F1.15	Система электроснабжения
		F1.16	Стояки системы ГВС
		F1.17	Стояки системы отопления
		F1.18	Стояки системы ХВС
		F1.19	Контроль температурного режима
		F1.20	Система вентиляции подвала
		F1.21	Аварийное электроснабжение
F2	Архитектурные элементы	F2.1	Окна
		F2.2	Отделочные покрытия помещений
		F2.3	Фасад

Код	Название группы	Код параметра	Название параметра
F3	Конструктивные элементы	F3.1	Перекрытия
		F3.2	Внутренние стены
		F3.3	Двери
		F3.4	Крыша
		F3.5	Несущие стены
		F3.6	Фундамент
F4	Эксплуатационные характеристики	F4.1	Год ввода в эксплуатацию
		F4.2	Признание дома аварийным
		F4.3	Общий износ здания
		F4.4	Класс энергетической эффективности
		F4.5	Отопительные приборы
		F4.6	Общее состояние дома

Программно-технический комплекс автоматизированной системы представляет собой интегрированное решение, объединяющее различные технологические платформы и обеспечивающее реализацию концепции цифрового двойника здания. Архитектура системы построена по модульному принципу, что обеспечивает гибкость конфигурирования под конкретные задачи и возможность поэтапного развертывания функциональности. Подсистема сбора данных реализована с использованием современных промышленных протоколов связи, включая Modbus RTU/TCP, OPC UA, MQTT и LoRaWAN, что обеспечивает совместимость с широким спектром датчиков и контроллеров различных производителей. Особое внимание уделено обеспечению кибербезопасности системы через применение современных методов шифрования данных, многоуровневой аутентификации пользователей и мониторинга попыток несанкционированного доступа. Подсистема обработки данных включает модули цифровой фильтрации сигналов, статистической обработки временных рядов, выявления аномалий и валидации достоверности поступающей информации. Алгоритмы предиктивной аналитики реализованы с использованием методов машинного обучения, включая регрессионный анализ, нейронные сети глубокого обучения и методы анализа временных рядов, что позволяет прогнозировать изменение технического состояния элементов здания с горизонтом от нескольких месяцев до нескольких лет. Подсистема визуализации обеспечивает интерактивное отображение состояния технологических систем здания в виде трехмерной модели, интегрированной с BIM-моделью объекта, что позволяет

операторам быстро локализовать проблемные участки и оценить масштаб необходимых работ.

Для оценки степени износа отдельных элементов и здания в целом в математической модели введены дополнительные соотношения, позволяющие автоматически рассчитывать показатели деградации на основе данных мониторинга. Степень износа i -ого элемента j -ой группы определяется как:

$$y_{j,i} = 1 - w_{j,i}$$

что обеспечивает интуитивно понятную интерпретацию результатов, где значение 0 соответствует новому элементу, а значение 1 — полностью изношенному элементу, требующему замены. Общая степень износа здания рассчитывается аналогично:

$$Y = 1 - W.$$

Такой подход позволяет получать сопоставимые оценки износа как для отдельных элементов, так и для здания в целом, что необходимо для принятия обоснованных решений о приоритетности проведения ремонтных работ и распределении ограниченных финансовых ресурсов.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная проверка разработанной автоматизированной системы управления технологическими процессами проводилась в несколько этапов, включающих как анализ больших массивов данных, так и практические испытания на реальных объектах с полным комплексом оборудования мониторинга. Первоначальная валидация математической модели осуществлялась на основе данных о техническом состоянии более чем 30 тысяч многоквартирных домов, собранных из откры-

тых источников Министерства жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации с использованием специально разработанного программного инструмента автоматизированного сбора информации. Из общего массива данных была сформирована репрезентативная выборка, включающая 300 зданий различных серий, построенных в период с 1990 по 2019 годы, для которых имелась наиболее полная информация о техническом состоянии конструкций и инженерных систем. Отбор объектов для детального анализа производился с учетом географического распределения, конструктивных особенностей зданий, климатических условий эксплуатации и качества ведения технической документации, что позволило обеспечить статистическую значимость результатов исследования. Особое внимание уделялось проверке корректности исходных данных через сопоставление с результатами независимых технических обследований и актами приемки выполненных ремонтных работ. Анализ полученных результатов показал высокую точность разработанной автоматизированной системы при оценке технического состояния современных зданий, где среднее отклонение расчетных значений от фактических составляет менее 5 %, что соответствует требованиям инженерной точности для данного класса задач.

Детальный анализ результатов работы автоматизированной системы выявил интересные закономерности в точности прогнозирования технического состояния зданий различных возрастных групп, что имеет важное практическое значение для планирования технического обслуживания. Для зданий, введенных в эксплуатацию после 2000 года, система демонстрирует исключительно высокую точность с отклонением менее 3 %, что объясняется более высоким качеством строительства, применением современных материалов и соблюдением технологических требований при возведении. Здания 1990-х годов показывают несколько большую погрешность про-

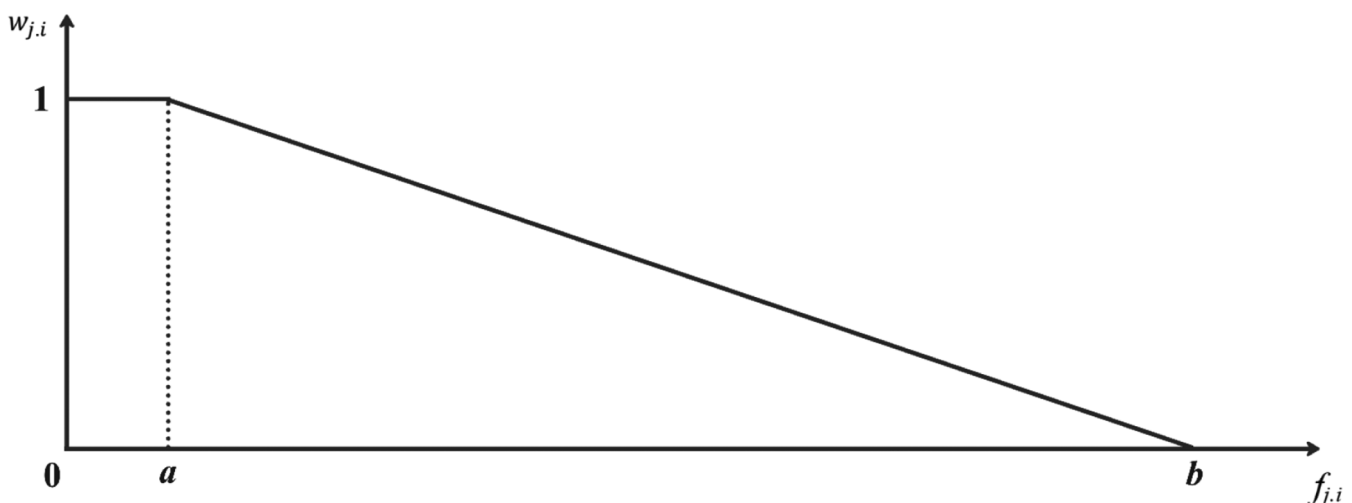


Рис. 1. Зависимость состояния технологического параметра от времени в автоматизированной системе

гнозирования (до 7 %), что связано с переходным периодом в строительной отрасли, когда происходило изменение нормативной базы и технологий строительства. Для зданий более ранних периодов постройки наблюдается увеличение погрешности до 10–12 %, что обусловлено влиянием множественных факторов: различия в качестве материалов, отклонения от проектных решений при строительстве, накопленные эффекты от проведенных ремонтов и модернизаций, а также воздействие внешних факторов, не всегда учитываемых в теоретической модели. Тем не менее, даже для зданий старших возрастных групп достигнутая точность является достаточной для практического применения системы в задачах планирования технического обслуживания и оценки приоритетности ремонтных работ. Статистический анализ распределения погрешностей показал нормальный характер их распределения, что подтверждает корректность выбранной математической модели и отсутствие систематических ошибок в алгоритмах расчета.

Дисперсионный анализ результатов работы автоматизированной системы позволил выявить основные факторы, влияющие на точность прогнозирования технического состояния зданий, и разработать рекомендации по повышению надежности системы. Наибольшее влияние на точность оценок оказывают полнота исходных данных о техническом состоянии здания, качество проведенных в прошлом ремонтных работ и особенности эксплуатации объекта. Здания, для которых ведется полная техническая документация с регулярным обновлением информации о состоянии конструкций и обо-

рудования, показывают значительно более высокую точность прогнозирования по сравнению с объектами, где документооборот ведется формально. Качество выполненных ремонтных работ также существенно влияет на точность системы: здания, где ремонты проводились с соблюдением технологических требований и использованием качественных материалов, демонстрируют более предсказуемое поведение технических параметров. Особенности эксплуатации, включающие режимы отопления, интенсивность использования помещений, своевременность проведения текущих ремонтов, создают дополнительную вариативность в состоянии зданий, которая учитывается системой через корректировочные коэффициенты. Географический фактор оказывает меньшее влияние на точность системы благодаря введению региональных весовых коэффициентов, учитывающих климатические особенности эксплуатации зданий в различных регионах России.

Практические испытания автоматизированной системы на объектах с полным комплексом IoT-датчиков и систем мониторинга в реальном времени продемонстрировали качественно новый уровень точности и надежности оценки технического состояния зданий. Второй этап экспериментальной проверки проводился на десяти многоквартирных домах различного типа, принадлежащих крупной управляющей компании, где была развернута полнофункциональная автоматизированная система с непрерывным мониторингом более чем 150 параметров технического состояния каждого здания. Установленное оборудование включало датчики

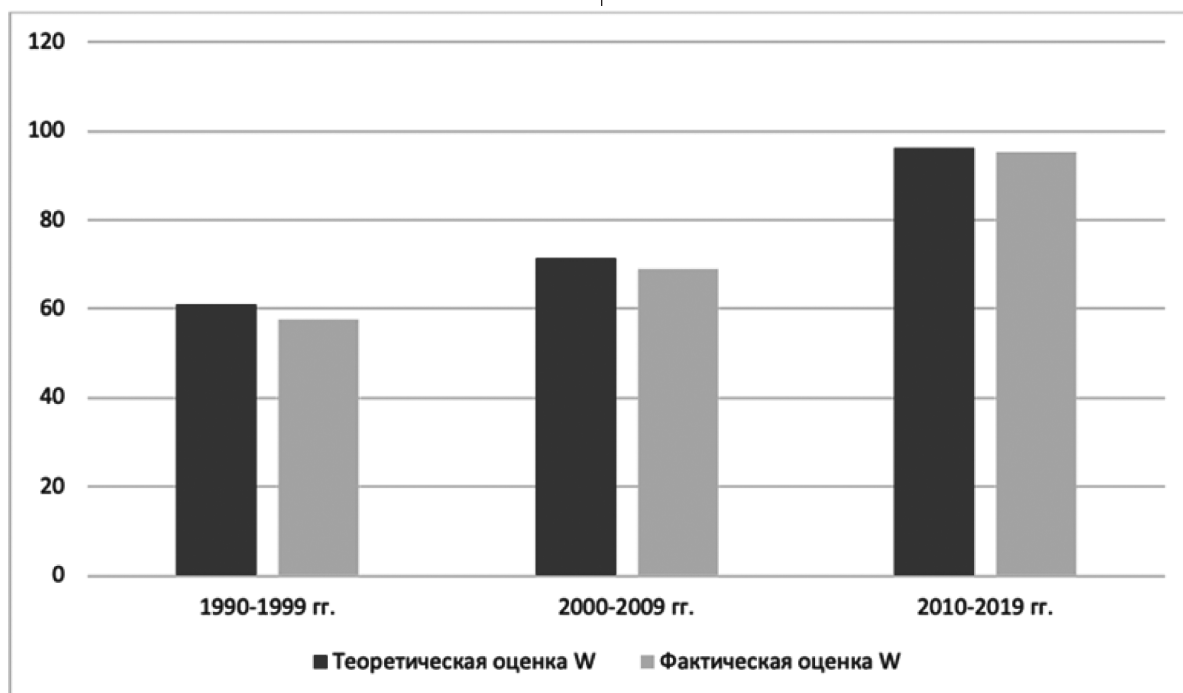


Рис. 2. Сравнение средних значений теоретических и фактических оценок автоматизированной системы по возрастным группам зданий

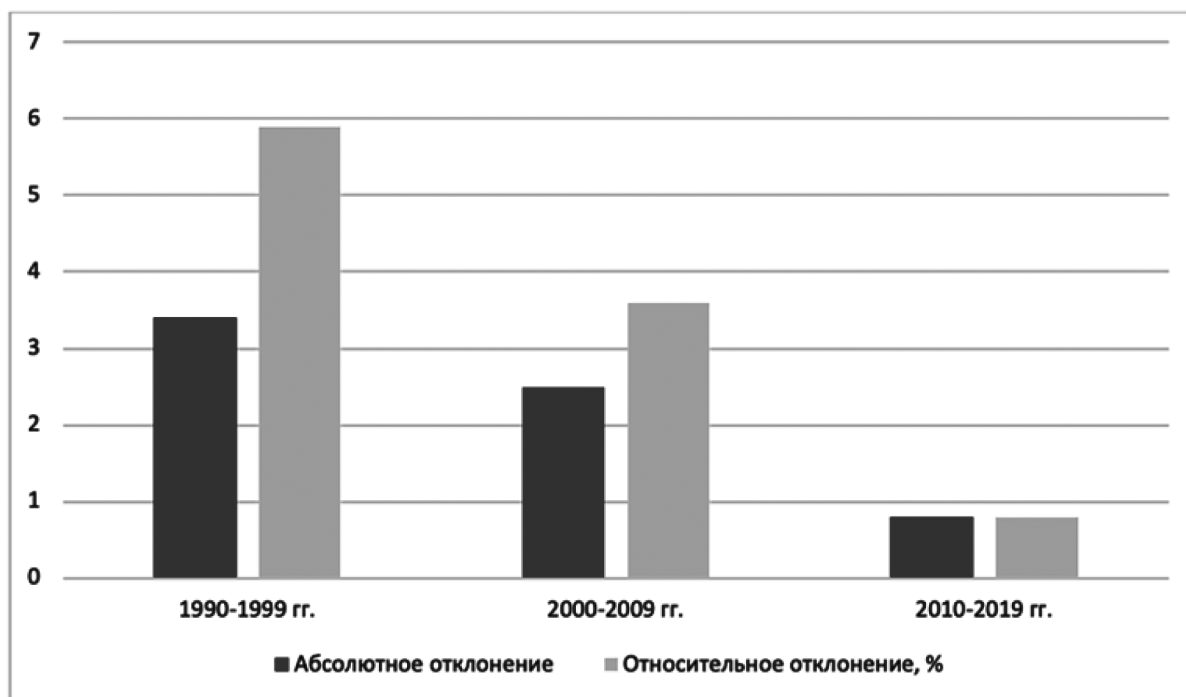


Рис. 3. Сравнение отклонений теоретических оценок автоматизированной системы от фактических по возрастным группам зданий

деформации несущих конструкций, температурно-влажностные сенсоры в подвалах и на чердаках, акселерометры для контроля вибраций от технологического оборудования, системы мониторинга протечек в инженерных системах, а также интеллектуальные счетчики всех видов ресурсов с функциями диагностики состояния сетей. Все датчики были интегрированы в единую сеть с использованием беспроводных технологий LoRaWAN, что обеспечило минимальные затраты на монтаж и высокую надежность передачи данных. Полученные результаты показали кардинальное улучшение точности оценки технического состояния: средняя погрешность системы составила менее 2 %, а максимальное отклонение не превысило 2,6 % даже для наиболее сложных случаев. Такая высокая точность достигается благодаря использованию актуальных данных мониторинга в реальном времени, что позволяет системе адаптироваться к фактическому состоянию здания и учитывать все значимые изменения в работе конструкций и инженерных систем.

Корреляционный анализ результатов мониторинга выявил сильные взаимосвязи между различными параметрами технического состояния зданий, что позволило оптимизировать алгоритмы работы автоматизированной системы и повысить надежность диагностики. Особенно тесная корреляция наблюдается между состоянием систем отопления и параметрами температурно-влажностного режима в помещениях (коэффициент корреляции 0,87), что позволяет системе диагностировать проблемы в теплоснабжении на ранней стадии их развития. Состояние кровельных конструкций показы-

вает высокую корреляцию с параметрами влажности в подкровельном пространстве (0,82), что обеспечивает своевременное выявление протечек и нарушений гидроизоляции. Интересные закономерности выявлены в корреляции между электрическими параметрами сетей и общим техническим состоянием здания: здания с более высокими показателями технического состояния демонстрируют более стабильные электрические характеристики, что объясняется комплексным подходом к техническому обслуживанию. Данные корреляционные зависимости были использованы для создания системы взаимного контроля показаний датчиков и повышения достоверности результатов мониторинга. В случае обнаружения аномальных значений одного из параметров система автоматически анализирует показания коррелированных датчиков для подтверждения или опровержения тревожной информации, что значительно снижает количество ложных срабатываний и повышает доверие операторов к автоматизированной системе.

Экономический эффект от внедрения автоматизированной системы управления техническим состоянием зданий оказался значительно выше первоначальных ожиданий, что подтверждает целесообразность инвестиций в цифровые технологии для сферы жилищно-коммунального хозяйства. Детальный анализ затрат на техническое обслуживание зданий, оборудованных автоматизированной системой, показал снижение эксплуатационных расходов на 18–25 % по сравнению с традиционными методами планового обслуживания.

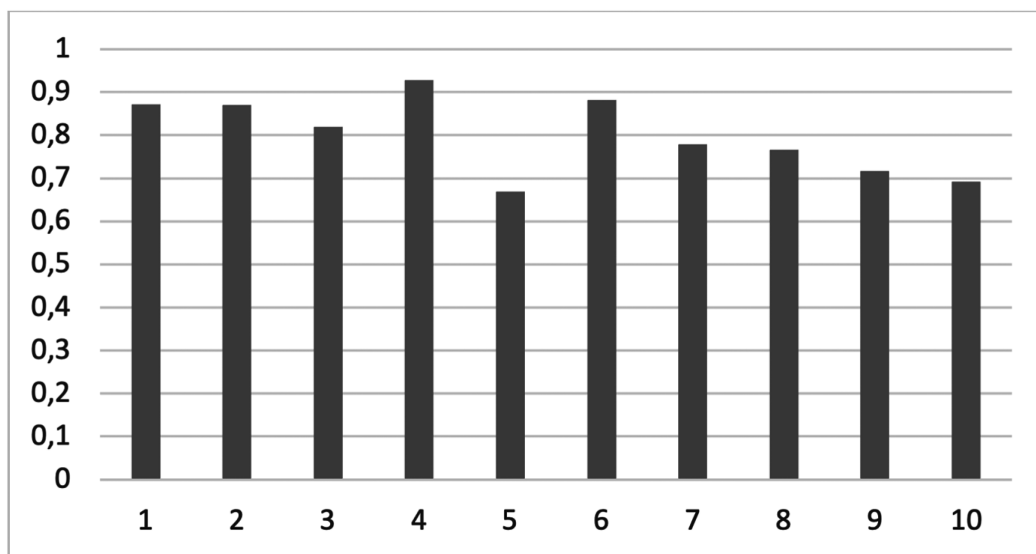


Рис. 4. Распределение значений корреляции для зданий с установленной АСУТП. По оси X представлены интервалы значений коэффициента корреляции, по оси Y — количество домов, попадающих в соответствующий интервал

Основная экономия достигается за счет перехода от планового к состоянию-ориентированному техническому обслуживанию, когда ремонтные работы проводятся не по расписанию, а при достижении параметрами технического состояния определенных пороговых значений. Такой подход позволяет избежать как преждевременной замены исправных элементов, так и аварийных ситуаций из-за внезапных отказов оборудования. Система предиктивного обслуживания, реализованная в автоматизированной системе, обеспечила сокращение времени простоя инженерных систем на 35–40 % благодаря заблаговременному планированию ремонтных работ и подготовке необходимых материалов и оборудования. Значительная экономия достигается также за счет оптимизации логистики технического обслуживания: система автоматически группирует ремонтные работы по территориальному принципу и совместимости выполняемых операций, что снижает транспортные расходы и повышает эффективность использования трудовых ресурсов. Внедрение автоматизированной системы позволило также существенно сократить штат административного персонала, занимающегося планированием и контролем технического обслуживания, при одновременном повышении качества выполняемых работ. Срок окупаемости инвестиций в автоматизированную систему для типового многоквартирного дома составляет 3,5–4,2 года, что является приемлемым показателем для данного класса технических решений.

Заключение

Проведенное исследование убедительно демонстрирует высокую эффективность и практическую зна-

чимость разработанной автоматизированной системы управления технологическими процессами для комплексной оценки технического состояния объектов капитального строительства. Созданная система успешно интегрирует современные цифровые технологии, включая Интернет вещей, предиктивную аналитику и концепцию цифрового двойника, в единый программно-технический комплекс, обеспечивающий качественно новый уровень управления техническим состоянием зданий. Математическая модель, лежащая в основе системы, показала высокую точность прогнозирования для зданий различных типов и возрастных групп, при этом наилучшие результаты достигаются для современных объектов, где погрешность не превышает 2–3 %. Экспериментальная проверка на реальных объектах с полным комплексом IoT-датчиков подтвердила способность системы обеспечивать непрерывный мониторинг технического состояния и своевременно выявлять потенциальные проблемы до их перехода в критическое состояние. Экономический эффект от внедрения системы составляет 18–25 % снижения эксплуатационных расходов при сроке окупаемости 3,5–4,2 года, что делает технологию привлекательной для широкого практического применения. Особую ценность представляет возможность перехода от планового к состоянию-ориентированному техническому обслуживанию, что не только снижает затраты, но и существенно повышает надежность и безопасность эксплуатации зданий. Разработанная система полностью соответствует требованиям действующих нормативных документов, включая новый ГОСТ 31937–2024, и создает технологическую основу для массового внедрения автоматизированных систем мониторинга в российской практике управления недвижимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Study on Bridge Structural Health Monitoring System Based on BIM And GIS // Transactions on Engineering and Technology Research. 2024. Том. 4, С. 327–331. DOI: 10.62051/12375a41
2. Bodily P.M., Griffith I.D., Hofle M., Heidari O., Lama S., Conlin A., Christiansen A., Moore D., Wilson K., Sebastian A., Schoen M.P. Automating Predictive Maintenance for Energy Efficiency via Machine Learning, and IoT Sensors // Proceedings of ISCA 34th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering. 2021. № 79. С. 54–63. DOI: 10.5555/3456123.3456789
3. Construction digital twin: a taxonomy and analysis of the application areas // Automation in Construction. 2024. № 105451. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105451
4. Jahangir M.F., Schultz C.P.L., Kamari A. A review of drivers and barriers of Digital Twin adoption in building project development processes // Journal of Information Technology in Construction. 2024. Том. 29. С. 141–178. DOI: 10.36680/j.itcon.2024.008
5. Digital twins and BIM: a systematic literature review // Buildings. 2023. Digital twins and BIM: a systematic literature review // Buildings. 2023. Том. 13, № 2. DOI: 10.3390/buildings13020345
6. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review // Sustainability. 2023. Том. 15, № 14. DOI: 10.3390/su151410908
7. Integrating AI in Structural Health Monitoring (SHM): A Systematic Review on Advances, Challenges, and Future Directions // SSRN. 2025.
8. Vuarnoz D., Hoxha E., Nembrini J., Jusselme T., Cozza S. Analyzing building energy performance uncertainty: An application to the design stage // Applied Energy. 2022. Том. 306. С. 118073. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118073
9. Muhammet Yildirim, Omer Giran. Implementation of Digital Twins in construction industry: A systematic review // Journal of Construction Engineering, Management & Innovation. 2024. Том. 7, №. 3. С. 189–212. DOI: 10.31462/jcemi.2024.03189212
10. Obinna C. Madubuike, Chimay J. Anumba, Rana Khallaf. A review of digital twin applications in construction // Journal of Information Technology in Construction. 2022. Том. 27. С. 145–172.
11. Predictive Maintenance in Buildings; Ultimate Guide 2024 // Neuroject. 2024.
12. Есть ли спрос в России на BIM и цифровые двойники? // Содис Лаб. 2024. URL: <https://www.sodislab.com/ru/blog/bim-russia> (дата обращения: 10.08.2024).
13. Цифровизация в строительстве: как технологии меняют девелоперские проекты // Цифра Строй. 2024. URL: <https://cifrastroy.ru/posts/kak-tehnologii-bim-tim-i-tsifrovye-dvojniki-menjajut-otrasl> (дата обращения: 12.08.2024).

© Парамонов Максим Юрьевич (Dozor97-19@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»