

ПРОЕКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫМИ СИСТЕМАМИ МОНИТОРИНГА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Ахмедов Хидаятхаджа Рустамхон ўғли

Магистрант Высшая школа бизнеса и предпринимательства при Кабинете
Министров Республики Узбекистан

Аннотация. В статье рассматривается проектное управление цифровыми системами мониторинга энергопотребления зданий на основе концепции цифрового двойника. Предлагается математическая модель расчёта фактической энергоэффективности здания с выделением базового бытового потребления. В отличие от преобладающих в научной литературе подходов, предлагаемая модель ориентирована на функционирование цифрового двойника без обязательного использования BIM-моделей и IoT-инфраструктуры, что существенно расширяет сферу её применимости в отношении широкого класса существующих зданий.

Ключевые слова: энергоэффективность; цифровой двойник; мониторинг энергопотребления; проектное управление; математическая модель.

PROJECT MANAGEMENT OF DIGITAL BUILDING ENERGY MONITORING SYSTEMS BASED ON A DIGITAL TWIN

Axmedov Xidayatxadja Rustamxon o'gli

Master's student at the Higher School of Business and Entrepreneurship
under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan

Введение. Интенсивный рост урбанизации, устойчивое повышение стоимости энергетических ресурсов и последовательное ужесточение экологических требований обуславливают необходимость разработки и внедрения интеллектуальных систем управления энергопотреблением зданий. Актуальность данного направления подтверждается широким кругом современных научных исследований, демонстрирующих высокий потенциал

технологии цифровых двойников в качестве инструмента повышения эксплуатационной эффективности объектов капитального строительства.

Вместе с тем в условиях продолжающейся цифровой трансформации строительной отрасли остаётся нерешённой проблема отсутствия унифицированной методики расчёта фактической энергоэффективности зданий на основе реальных эксплуатационных данных. Восполнение данного методического пробела представляется задачей первостепенной научно-практической значимости. Настоящее исследование посвящено разработке и интеграции математической модели энергоэффективности в архитектуру цифрового двойника здания.

Аналитический обзор зарубежных исследований. Зарубежные исследования в области цифровых двойников зданий ориентированы преимущественно на интеграцию цифровых моделей с BIM-структурами и IoT-инфраструктурой. Данный методологический подход, несмотря на свою технологическую состоятельность, существенно ограничивает применимость цифровых двойников к существующему фонду зданий, не располагающему необходимой сенсорной и информационной инфраструктурой.

Концепция цифрового двойника зданий активно разрабатывается в зарубежной научной литературе начиная с середины 2010-х годов, однако смысловое наполнение данного понятия и методологические подходы к его реализации существенно варьируются в зависимости от дисциплинарной традиции и прикладного контекста. В ряде основополагающих работ цифровой двойник определяется как динамическая виртуальная копия физического объекта, обеспечивающая непрерывный обмен данными в режиме реального времени и позволяющая моделировать поведение объекта в различных эксплуатационных условиях. Данная трактовка, впоследствии закреплённая в международном стандарте ISO 23247:2021, заложила концептуальный фундамент для последующих прикладных исследований в строительной отрасли.

Наиболее разработанным направлением в актуальной научной литературе остаётся интеграция цифровых двойников с BIM-структурами (Building Information Modelling). Voje и др. (2020) обосновывают перспективность семантически обогащённых BIM-моделей как информационной основы для цифровых двойников строительных объектов, акцентируя внимание на необходимости стандартизации онтологий для обеспечения межсистемной совместимости. Вместе с тем авторы признают, что предложенный подход предполагает наличие полной BIM-документации с момента проектирования объекта, что делает его практически неприменимым к зданиям, введённым в эксплуатацию до широкого распространения BIM-технологий. Данное ограничение носит системный характер: по различным оценкам, свыше 80% существующего мирового фонда зданий не располагает актуальными BIM-моделями, что кардинально сужает область применимости рассматриваемого подхода.

Параллельно развивается направление, связывающее цифровые двойники с IoT-инфраструктурой и системами автоматизации зданий (BAS/BMS). Vortolini и др. (2022) демонстрируют эффективность цифровых двойников для повышения энергетической эффективности зданий, однако предложенные решения базируются на плотной сети IoT-датчиков и систем телеметрии, требующих значительных капитальных вложений и специализированного обслуживания. Авторы не рассматривают сценарии с ограниченной или отсутствующей сенсорной инфраструктурой, что существенно снижает универсальность предлагаемых методов. Аналогичные ограничения характерны для работ в смежной области цифровых двойников производственных систем. Так, Lu и др. (2021), исследуя цифровые двойники в контексте умного производства, опираются на непрерывные потоки сенсорных данных как обязательное условие функционирования модели.

Критический анализ рассмотренных исследований позволяет выявить устойчивый методологический разрыв между технологически развитыми

концепциями цифровых двойников и реальными условиями эксплуатации подавляющего большинства существующих зданий.

Во-первых, доминирующие подходы предполагают обязательное наличие BIM-документации и/или развитой IoT-инфраструктуры, что создаёт высокий барьер входа и ограничивает масштабируемость решений.

Во-вторых, в рассмотренных работах отсутствует унифицированный математический аппарат расчёта фактической энергоэффективности на основе агрегированных данных коммерческого учёта энергоресурсов — наиболее доступного и повсеместно распространённого источника информации. Данная статья отражает результаты исследования направленного на восполнение данного методологического пробела посредством разработки детерминированной модели, адаптированной к условиям информационной ограниченности и применимой к широкому классу существующих зданий без модернизации их инженерных систем.

Методология и авторская модель цифрового двойника.

Методологическую основу исследования составляет концепция детерминированного моделирования энергетического поведения здания на основе реально зафиксированных эксплуатационных данных. Выбор детерминированного подхода обусловлен рядом практических соображений:

во-первых, он не требует обширных обучающих выборок, необходимых для методов машинного обучения;

во-вторых, обеспечивает интерпретируемость результатов, принципиально важную для принятия управленческих решений;

в-третьих, устойчиво работает в условиях неполноты и нерегулярности исходных данных, характерных для большинства эксплуатируемых зданий.

По данным Международного энергетического агентства (IEA, 2023), здания обеспечивают около 30% мирового потребления энергии и генерируют порядка 26% связанных с энергетикой выбросов CO₂, что обуславливает высокую практическую значимость точных и доступных

инструментов оценки их энергоэффективности. В данном случае цифровой двойник здания трактуется как математически формализованная модель его энергетического поведения, реализованная исключительно на основе данных коммерческого учёта энергоресурсов и не требующая интеграции со специализированными сенсорными системами.

Ключевым методологическим решением предлагаемой модели является концепция базового бытового потребления — условно-постоянной составляющей суммарного энергопотребления здания, не зависящей от сезонных климатических нагрузок. Эмпирическое основание для выделения данной составляющей формируется за счёт использования данных переходных месяцев — апреля и сентября, — которые в климатических условиях умеренного континентального пояса характеризуются минимальным отоплением и минимальным охлаждением соответственно. Согласно статистике эксплуатации жилищного фонда Узбекистана, среднесуточные температуры в апреле составляют +14...+18 °С, в сентябре — +19...+23 °С, что соответствует зоне теплового комфорта и практически исключает потребность в активном климат-контроле. Базовое бытовое потребление (N_2) рассчитывается как среднее арифметическое потребления за указанные месяцы по формуле:

$$N_2 = (A + S) / 2,$$

где A — среднемесячное потребление энергоресурсов в апреле; S — среднемесячное потребление энергоресурсов в сентябре.

Выбор усреднения двух месяцев вместо одного обусловлен необходимостью нивелирования случайных отклонений, связанных с нерегулярными поведенческими факторами (например, отпускной период в сентябре или праздничные дни в апреле), что повышает робастность оценки базового уровня. Физический смысл величины N_2 состоит в том, что она отражает неустранимое минимальное потребление, обусловленное функционированием постоянно включённых приборов, систем освещения, горячего водоснабжения и приготовления пищи — то есть тех нагрузок,

которые практически не варьируются в зависимости от сезона. Для типичного многоквартирного жилого дома в климатических условиях Центральной Азии данная составляющая, по имеющимся отраслевым данным, составляет от 35 до 55% годового потребления природного газа и от 60 до 75% годового потребления электроэнергии, что подчёркивает диагностическую ценность её корректного определения.

Экономия энергоресурсов в анализируемом периоде относительно базового уровня рассчитывается по следующим зависимостям:

$R = N_1 - N_2$ — экономия потребления природного газа;

$Q = T_1 - T_2$ — экономия потребления электрической энергии,

где N_1 и T_1 — фактические значения потребления природного газа и электрической энергии в анализируемом расчётном периоде соответственно; N_2 и T_2 — соответствующие значения базового бытового потребления, определённые по формуле (1). Отрицательное значение R или Q свидетельствует о превышении фактического потребления над базовым уровнем, что является сигналом о нештатном режиме эксплуатации инженерных систем или об аномальном поведенческом паттерне пользователей и требует отдельного диагностического анализа в рамках цифрового двойника.

Архитектура цифрового двойника (Case Study). Разработанная архитектура цифрового двойника здания включает три взаимосвязанных функциональных компонента: вычислительное ядро, модуль обработки эксплуатационных данных и аналитический блок расчёта энергоэффективности. Вычислительное ядро реализует детерминированную математическую модель, описанную в предыдущем разделе, и обеспечивает формирование агрегированных показателей энергетической результативности в разрезе временных периодов. Модуль обработки данных осуществляет верификацию, нормализацию и структурирование входных массивов, поступающих от поставщиков энергоресурсов в форме счётчиковых показаний и актов коммерческого учёта. Аналитический блок

формирует расчётные значения базового бытового потребления (N_2), а также показатели экономии по газу (R) и электроэнергии (Q), которые визуализируются в динамике и могут быть экспортированы для интеграции с системами управления объектом.

Принципиальной особенностью предлагаемой архитектуры является её независимость от обязательного применения BIM-моделей и IoT-датчиков. Данное проектное решение продиктовано реальными условиями эксплуатации отечественного и регионального фонда зданий, в частности по данным Международного энергетического агентства (IEA), более 75% существующих зданий в странах с развивающейся экономикой не оснащены автоматизированными системами учёта энергопотребления и не располагают BIM-документацией. Стоимость оснащения одного здания полноценной IoT-сенсорной инфраструктурой составляет, по различным оценкам, от 15 000 до 80 000 долларов США в зависимости от площади и функционального назначения объекта, что делает данный путь экономически нецелесообразным для основной массы эксплуатирующих организаций. Предлагаемый подход обходит данный барьер: единственным обязательным источником входных данных служат ежемесячные показания счётчиков газа и электроэнергии, которые в силу нормативных требований к коммерческому учёту доступны для любого подключённого к энергосистеме здания.

Апробация архитектуры проводилась на объекте жилого фонда с общей площадью порядка 3 200 м², введённом в эксплуатацию до 2000 года и не имеющем автоматизированных систем диспетчеризации. В качестве входных данных использовались ежемесячные показатели потребления природного газа и электрической энергии за 36-месячный период наблюдений. Расчёт базового бытового потребления по предложенной выше методике позволил выявить систематическое превышение фактического потребления газа над базовым уровнем в осенне-зимний период в среднем на 34%, тогда как в переходные периоды (апрель, сентябрь) отклонение не превышало 6–8%, что подтверждает корректность принятого метода

выделения сезонной составляющей. Расчётная экономия газа (R) по итогам внедрения управленческих корректирующих мероприятий, сформированных на основе аналитики цифрового двойника, составила 11,7% от годового объёма потребления, что в абсолютном выражении соответствует снижению эксплуатационных затрат на энергоресурсы приблизительно на 18–22% относительно базового периода. Полученные результаты согласуются с данными Bortolini и др. (2022), зафиксировавших диапазон энергосбережения 10–25% при использовании аналитических цифровых двойников, и подтверждают обоснованность предложенного методологического подхода.

Масштабируемость архитектуры обеспечивается модульным принципом её построения, т.е. при наличии дополнительных источников данных — показаний индивидуальных приборов учёта тепловой энергии, данных о погодных условиях или параметрах внутренней среды — аналитический блок допускает расширение без изменения вычислительного ядра. Таким образом, предлагаемое решение может служить точкой входа в цифровизацию управления энергопотреблением для организаций с ограниченными ресурсами, обеспечивая верифицируемые результаты уже на минимальном уровне информационной оснащённости объекта.

Барьеры и проблемы внедрения цифровых двойников. Внедрение технологии цифровых двойников в практику управления энергопотреблением зданий сопряжено с рядом существенных барьеров институционального, технологического и организационного характера. К числу ключевых проблем относится отсутствие единых отраслевых стандартов представления, хранения и межсистемного обмена эксплуатационными энергетическими данными. Данное обстоятельство существенно затрудняет интеграцию разнородных информационных систем и обеспечение сопоставимости результатов расчётов в межобъектном и межотраслевом измерениях.

Значительным системным барьером выступает фрагментация нормативно-правовой базы в области энергоэффективности и цифровизации

строительного комплекса. Действующие строительные и энергетические нормативные документы разрабатывались преимущественно в ориентации на статические методы проведения энергетических обследований и не предусматривают регламентации применения инструментов непрерывного цифрового мониторинга и анализа.

К организационным проблемам относится ограниченная доступность достоверных ретроспективных данных об энергопотреблении объектов, а также невысокий уровень цифровой зрелости организаций, осуществляющих техническую эксплуатацию зданий. Дополнительным сдерживающим фактором является дефицит специалистов, обладающих компетенциями на стыке энергетики, цифровых технологий и аналитического моделирования.

Рекомендации и направления развития. Для преодоления выявленных технологических и институциональных барьеров представляется целесообразным развитие системы стандартизации в области цифровых двойников энергопотребления зданий, предусматривающей разработку единых требований к структуре эксплуатационных данных и унифицированных методик расчёта фактической энергоэффективности, применимых в условиях действующей нормативной базы.

В сфере кадрового обеспечения рекомендуется разработка специализированных образовательных программ и программ дополнительного профессионального образования, направленных на подготовку специалистов в области цифровых двойников, энергетического анализа и управления жизненным циклом объектов недвижимости.

С точки зрения нормативного регулирования необходима планомерная адаптация действующих строительных и энергетических норм к условиям цифровой трансформации отрасли, включая законодательное закрепление возможности применения цифровых двойников в процедурах обязательного энергетического аудита и государственного мониторинга энергопотребления.

Апробированная в рамках настоящего исследования модель цифрового двойника может быть эффективно применена в жилищном секторе,

административных и общественных зданиях, а также адаптирована для промышленных объектов, характеризующихся устойчивыми режимами технологической эксплуатации.

Заключение. В результате проведенного исследования разработана и теоретически обоснована математическая модель цифрового двойника здания, предназначенная для расчёта фактической энергоэффективности на основе эксплуатационных данных коммерческого учёта энергоресурсов. Принципиальным преимуществом предложенного подхода является отказ от обязательного использования BIM-моделей и IoT-инфраструктуры, что существенно расширяет практическую область применения модели и повышает её реализуемость в условиях существующего фонда зданий.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение модели за счёт учёта поведенческих факторов пользователей, интеграция методов прогностического анализа и адаптация модели к специфике различных функциональных типов зданий. Практическим результатом развития предложенного подхода ожидается повышение эффективности управления энергопотреблением и снижение эксплуатационных затрат на содержание объектов недвижимости.

Список литературы

1. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research // *Automation in Construction*. — 2020. — Vol. 114. — Article 103179.
2. Bortolini M., Ferrari E., Gamberi M., Pilati F., Regattieri A. Digital twins for energy efficiency in buildings // *Energies*. — 2022. — Vol. 15, No. 19. — Article 7002.
3. Lu Y., Liu C., Wang K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. — 2021. — Vol. 61. — Article 101837.
4. Хамракулов Р.Д. Интеграция IoT и BIM в управлении жизненным циклом зданий // *Архитектура и строительство*. — Ташкент, 2021. — № 3. — С. 44–51.
5. ISO 23247:2021. Automation systems and integration — Digital Twin framework for manufacturing.