УДК 697:004.8

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В УПРАВЛЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ ЗДАНИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Кугрышева Н.Ю., студентка гр. 17В41
Научный руководитель: Е.В. Телипенко, к.т.н. доцент
Юргинский технологический институт (филиал)
Национального исследовательского Томского
политехнического университета
Россия, г. Юрга

В настоящее время цифровые двойники всё чаще применяются для управления инженерными коммуникациями зданий. Интерес к ним со стороны управляющих компаний и владельцев недвижимости легко объяснить. Технология позволяет повышать качество управления и стабильность работы оборудования, но в то же время снижать затраты на обслуживание. Такой результат ещё более актуален в условиях ужесточения требований к энергоэффективности.

Главное преимущество цифровых двойников перед традиционными системами – это прогнозирование. Они не только показывают, что происходит с системой прямо сейчас, но и моделируют её поведение в будущем. Благодаря этому можно оптимизировать эксплуатацию, проверять разные сценарии и, что крайне важно, заранее предотвращать крупные аварии в сложных инженерных сетях.

Основная идея цифрового двойника – создать виртуальную модель реального объекта, которая постоянно обновляется на основе поступающих данных. Такой подход строится на многоуровневой системе, где последовательно выполняются сбор информации, математическое моделирование, анализ данных и визуализация результатов. Каждый этап требует специального технического обеспечения и методов работы.

Математические модели для систем отопления могут быть как простыми, так и сложными – от линейных уравнений до комплексных нелинейных систем. Выбор подходящей модели зависит от решаемых задач. Для повседневного управления подходят относительно простые, а для долгосрочного планирования и оптимизации нужны более сложные расчёты. Наиболее актуальны модели, учитывающие способность строительных конструкций накапливать тепло и влияние изменений погоды. Наглядно работу математической модели можно представить на примере системы отопления, которая постоянно рассчитывает тепловой баланс помещения, учитывая поступление тепла от радиаторов и теплопотери через ограждающие конструкции. Даже такая упрощённая модель позволяет с высокой точностью прогнозировать, когда необходимо

включить котёл, чтобы к заданному времени достичь комфортной температуры.

Качество данных с датчиков напрямую влияет на работу цифрового двойника. Поэтому системы сбора информации должны включать проверку достоверности показаний и фильтрацию помех. На практике это означает необходимость создания специальных алгоритмов для восстановления пропущенных данных и фильтрации зашумлённых измерений.

Эти и другие функциональные возможности реализуются в рамках готовых технологических решений. Сегодня на рынке представлены различные технологические решения для создания цифровых двойников. Среди них есть как специализированные программные комплексы, включая коммерческие продукты для точного моделирования и бесплатные решения с открытым кодом, так и универсальные платформы для промышленного интернета вещей. Выбор подходящего инструмента зависит от требуемой точности расчётов, имеющегося бюджета и квалификации специалистов. Каждое решение имеет свои сильные и слабые стороны, которые нужно учитывать при выборе.

Облачные платформы упрощают развёртывание сложных вычислительных моделей, не требуя значительных затрат на оборудование, что соответствует потребностям распределённых объектов, где важно централизовать управление и анализ данных. Например, управляющая компания жилого комплекса может использовать облачный цифровой двойник для одновременного контроля систем отопления в нескольких домах. Такая организация работы способствует сравнению эффективности работы оборудования, оперативному выявлению отклонений в расходе тепла и предложению вариантов решений возникающих проблем. Однако при использовании облачных решений остаются актуальными вопросы защиты информации и зависимости от скорости интернет-соединения.

Внедрение цифровых двойников в существующие системы управления зданиями связано с техническими и организационными трудностями. Главная техническая сложность – это совместимость со старыми системами автоматизации. Многие из них не умеют обмениваться данными по современным стандартам, поэтому приходится разрабатывать специальные преобразователи данных.

С экономической точки зрения внедрение цифровых двойников выгоднее всего на крупных объектах с высоким энергопотреблением. Даже небольшая оптимизация работы их оборудования даёт значительную экономию. Для небольших зданий подойдут упрощённые версии систем с базовым набором функций.

Решения только технических задач недостаточно. Также следует изменить подход к организации работы и обучить персонал работе с цифровыми двойниками. Инженерам и операторам теперь нужно не только знать правила эксплуатации оборудования, но и разбираться в математических моделях и анализе данных. Это требует разработки специальных учебных программ и организации постоянного обучения сотрудников. Например, можно рассмотреть

подготовку диспетчеров, ранее работавших с традиционными системами контроля. Сначала специалисты учатся понимать, как цифровой двойник предсказывает изменения температуры, затем осваивают работу с прогнозами, а после этого уже переходят к полноценному управлению. Такой подход обеспечивает постепенную подготовку специалистов без прерывания работы действующих систем.

Эффективность цифровых двойников оценивают по нескольким критериям. Согласно исследованиям, инвестиции в такие проекты обычно окупаются за период от 2 до 5 лет. При расчёте экономической эффективности учитывается не только прямая экономия энергоресурсов, но и дополнительные преимущества, включая продление срока службы оборудования за счёт оптимизации режимов его эксплуатации.

Техническая эффективность определяется точностью прогнозов и качеством управления. Правильно настроенные цифровые двойники позволяют уменьшить отклонения температурных показателей от заданных значений на 15-20% по сравнению с традиционными системами управления. Это достигается за счёт более точного прогнозирования тепловой нагрузки и своевременной корректировки работы оборудования.

Экологический эффект проявляется в снижении выбросов парниковых газов благодаря оптимизации энергопотребления. По данным исследований, внедрение цифровых двойников в системах ОВК снижает энергопотребление на 10-25% в зависимости от типа объекта и климатических условий. Это делает технологию важным инструментом достижения целей устойчивого развития.

Развитие технологий цифровых двойников для систем ОВК идёт в нескольких направлениях. Одно из наиболее перспективных – интеграция с системами искусственного интеллекта и машинного обучения, что способствует созданию самонастраивающихся моделей, адаптирующихся к изменяющимся условиям эксплуатации. И особый интерес здесь представляют алгоритмы глубокого обучения, которые могут выявлять сложные взаимосвязи в работе инженерных систем зданий.

Другое важное направление – создание цифровых двойников, охватывающих полный жизненный цикл здания – от проектирования и строительства до эксплуатации и последующей модернизации. Его реализация требует разработки новых методов интеграции разнородных данных и формирования единого информационного пространства для всех участников проекта.

В программах энергосбережения и цифровизации ЖКХ высоким спросом пользуются готовые решения для типовых объектов. Стандартизированные цифровые двойники жилых и общественных зданий позволяют значительно сократить сроки внедрения и снизить затраты.

Совершенствование технологий работы с данными в реальном времени и рост вычислительных мощностей создают основу для разработки всё более сложных и точных моделей. Это, в свою очередь, выводит оптимизацию инженерных систем на качественно новый уровень, позволяя учитывать взаимное влияние различных систем здания. Отдельного внимания заслуживает

создание цифровых двойников для целых городских кварталов, что позволит оптимизировать работу централизованных систем энергоснабжения.

На основе проведённого анализа можно сформулировать ряд практических выводов о внедрении технологии:

- Цифровые двойники достигли уровня зрелости, достаточного для широкого практического применения. Наибольший эффект от внедрения наблюдается в сегменте коммерческой недвижимости и объектов социальной инфраструктуры.
- Успешное внедрение требует комплексного подхода, учитывающего как технические, так и организационные аспекты. Большое значение имеет обеспечение совместимости с существующими системами автоматизации и подготовка персонала. Не менее важен тщательный экономический анализ, обосновывающий инвестиции в создание цифровых двойников.
- Опыт успешных внедрений показывает, что на начальном этапе эффективно сосредоточиться на пилотных проектах для отдельных систем здания с последующим масштабированием. Модульность архитектуры цифрового двойника при этом является важным фактором, позволяющим постепенно наращивать функциональные возможности.
- Современные платформы достаточно гибкие. Их можно адаптировать к любым объектам – от крупных бизнес-центров до больниц и школ. Это делает технологию доступной для большинства зданий.
- Особенно важно, что функциональные возможности цифровых двойников позволяют перейти от наблюдения за энергопотреблением к активному управлению инженерным оборудованием. Система прогнозирует нагрузку и выбирает оптимальные режимы работы, что сокращает эксплуатационные расходы на 20-30%. Именно эта выгода многократно перекрывает затраты на интеграцию и переобучение персонала.
- Технология продолжает развиваться и становится всё более доступной и адаптивной. В будущем с подключением искусственного интеллекта прогнозы станут ещё точнее, а управление – более автоматизированным. Но уже сегодня цифровые двойники доказали свою эффективность на практике.
- Для успешного использования технологии необходимо сотрудничество между разработчиками программ, специалистами по эксплуатации и научными центрами. Такой подход поможет полноценно использовать возможности цифровых двойников.

Список литературы:

1. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования [Электронный ресурс] // CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-tehnologii-stsenarii-ispolzovaniya/viewer (дата обращения: 15.11.2025).

2. Цифровые двойники для повышения энергоэффективности зданий [Электронный ресурс] // ESJ Today. – URL: https://esj.today/PDF/12SAVN224.pdf (дата обращения: 15.11.2025).

3. Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта (на примере исследовательского реактора) [Электронный ресурс] // CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-kompleksnogo-tsifrovogo-dvoynika-slozhnogo-inzhenernogo-obekta-na-primere-issledovatelskogo-reaktora-niyau-mifi (дата обращения: 15.11.2025).

4. Математическая модель теплоснабжения помещения как объекта динамического управления температурой [Электронный ресурс] // CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-teplosnabzheniya-pomescheniya-kak-obekta-dinamicheskogo-upravleniya-temperaturoy/viewer (дата обращения: 15.11.2025).

5. Технологии сбора и обработки данных для создания цифровых двойников [Электронный ресурс] // CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-sbora-i-obrabotki-dannyh-dlya-sozdaniya-tsifrovyh-dvoynikov/viewer (дата обращения: 15.11.2025).