Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/57SAVN225.pdf

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Топчий, Д. В. Матричная структура для эффективности цифровых двойников в промышленных проектах: улучшение решения проблем / Д. В. Топчий, О. Д. Альоода // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/57SAVN225.pdf.

For citation:
Topchiy D.V., Alyooda O.J. A matrix framework for digital twin efficiency in industrial projects: enhancing problems solving. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 57SAVN225. Available at: https://esj.today/PDF/57SAVN225.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 69.009.1

Топчий Дмитрий Владимирович
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Заведующий кафедрой «Испытания сооружений»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: TopchiyDV@mgsu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=631269

Альоода Осама Джаббар
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Аспирант кафедры «Испытания сооружений»
E-mail: Osamaajabbar86@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1229-2082

Матричная структура для эффективности цифровых двойников в промышленных проектах: улучшение решения проблем

Аннотация. Промышленные проекты сталкиваются с постоянными проблемами, включая неточность проектирования, перерасход бюджета и задержки, которые усугубляются несколькими причинами. Технологии цифровых двойников обещают революционные решения, обеспечивая мониторинг в реальном времени, предиктивную аналитику и совместное принятие решений. Однако в существующих фреймворках отсутствуют методологии оценки цифровых двойников на разных этапах проекта или измерения их влияния на решение проблем. В данном исследовании предлагается новая многомерная матричная структура для систематической оценки эффективности цифровых двойников в решении проблем, с которыми сталкиваются промышленные проекты на всех этапах жизненного цикла. Объединяя экспертные опросы, аналитический иерархический процесс для определения приоритетности проблем и математически строгую матрицу согласования и влияния, работа измеряет взаимосвязи между цифровыми двойниками, задачами и проблемами. Основные результаты показывают, что интеграция цифровых двойников повышает точность проектирования на 42 % (индекс воздействия = 4,50) и снижает непредвиденные расходы на 37 %, при этом эффективность решения проблем достигает максимального значения 45,7 при наличии конфликтов проектирования. Предложенная матрица служит инструментом прогнозирования для развертывания цифровых двойников и проверяется с использованием 25 технических

показателей. Эта структура объединяет технические и управленческие области и предоставляет практические рекомендации по определению приоритетов интеграции цифровых двойников и максимизации окупаемости инвестиций в промышленные проекты. Работа способствует реализации концепции Индустрии 4.0, связывая теоретический потенциал цифровых двойников с эмпирическими потребностями управления проектами.

Ключевые слова: цифровое двойник; взвешенные по методу AHP вызовы; управление жизненным циклом; эффективность решения проблем; математическая матрица; Индустрия 4.0

Введение

Появление Индустрии 4.0 [1] вывело цифровых близнецов — виртуальные реплики физических систем, позволяющие проводить симуляцию, мониторинг и предиктивную аналитику в реальном времени — на передний план индустриальных инноваций.

В настоящем исследовании термин «цифровой двойник» (ЦД) [2] используется как центральное понятие, определяющее характер предлагаемого подхода к повышению эффективности управления промышленными проектами. Вместе с тем, в целях повышения научной строгости следует опираться на нормативное определение, закреплённое в ГОСТ Р 57700.37-2021 «Цифровые модели и цифровые двойники. Основные положения», согласно которому «цифровой двойник — это цифровая модель объекта, обладающая способностью к синхронизации с объектом в реальном времени».

В рамках данной статьи также рассматриваются более прикладные трактовки, включая определение цифрового двойника как виртуальной реплики физической системы, как программного аналога физического устройства, моделирующего внутренние процессы и поведение объекта в условиях воздействия помех и окружающей среды (АО «МЦД»). Однако эти определения, как и нормативное, не учитывают особенностей строительной и, в частности, промышленно-строительной сферы, где ключевыми характеристиками цифрового двойника являются: способность к поэтапной интеграции с данными информационного моделирования (BIM), учёт строительной логистики, режимов эксплуатации, требований к безопасности, устойчивости и соответствию нормативной документации.

В этой связи под цифровым двойником в контексте промышленного строительства в данной работе понимается цифровая модель, обладающая следующими признаками:

- синхронизация с объектом на различных фазах жизненного цикла (от проектирования до эксплуатации);
- функциональная совместимость с задачами управления проектом, мониторинга, планирования, предиктивной аналитики;
- адаптация к отраслевой специфике, включая структуру строительных процессов, типизацию объектов и ограниченности среды исполнения (стройплощадка, рельеф, климат и т. д.).

Таким образом, авторы опираются на нормативную базу, но предлагают отраслевую интерпретацию термина, обеспечивающую его релевантность к задачам промышленного строительства.

[1] Индустрия 04. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/5e740c5b9a79470c22dd13e7 (дата обращения: 07.06.2025).

[2] ЦД. — URL: https://digitaltwin.ru/products/digital-twin/ (дата обращения: 07.06.2025).

В сложных проектах, охватывающих инфраструктуру, производство и энергетику, ЦД[2] обещают значительные улучшения в области эффективности, снижение затрат и уменьшение рисков. Тем не менее, несмотря на их теоретический потенциал, более 65 % промышленных проектов не достигают запланированных преимуществ от внедрения ЦД, при этом 42 % пользователей указывают на «неопределенные показатели возврата инвестиций» и «фрагментарную интеграцию жизненного цикла» в качестве ключевых препятствий [1; 2]. Это расхождение подчеркивает существенный пробел в исследованиях: отсутствие структур, выстроенных на основе системного подхода, которые бы учитывали фазовую специфику жизненного цикла строительного объекта и позволяли количественно оценивать эффективность внедрения цифровых технологий. Под систематическими, стратифицированными по фазам структурами в исследовании понимаются иерархически организованные модели, в которых функции цифровых двойников соотнесены с конкретными задачами и проблемами, характерными для отдельных этапов жизненного цикла — от планирования до эксплуатации. Такие структуры позволяют не только обеспечить согласование технических возможностей цифровых двойников с прикладными требованиями проектов, но и приоритизировать функциональности, то есть ранжировать и оценивать значимость отдельных функций цифровых двойников (например, моделирования, прогнозирования, обнаружения аномалий) в контексте их вклада в решение ключевых проектных задач и устранение возникающих проблем на каждом этапе реализации проекта.

Проблемная Область. Промышленные проекты по своей природе отличаются высокой степенью сложности и сопровождаются множеством взаимосвязанных проблем, включая: ошибки проектирования (по статистике, 58 % проектов требуют корректировок из-за несоответствия проектных решений фактическим условиям); превышение бюджета и затягивание сроков реализации, часто возникающие из-за запоздалого принятия решений; а также информационные разрывы между используемыми цифровыми инструментами (например, BIM и ERP), которые препятствуют непрерывной передаче и согласованию данных на разных этапах реализации проекта [3]. Затраты и превышение сроков: 72 % мегапроектов превышают бюджет более чем на 40 %, что часто связано с реактивным принятием решений [4].

Строительные проекты обычно реализуются на уникальных площадках, и их характеристики различаются в зависимости от климата, геометрии и других факторов. Следовательно, строительную площадку невозможно воспроизвести, и небольшие недочеты в планировании могут привести к изменениям в ранее разработанном проекте. Кроме того, окружающая среда, в которой происходит строительство, также имеет свои конкретные особенности, такие как рельеф, погодные условия, близость зданий, используемые материалы и оборудование, и другие факторы. Эти особенности строительства наблюдаются в промышленных строительных проектах [6].

Несколько лет назад голландское правительство и его связанные учреждения заключили соглашение в области смарт-индустрии. Эта программа включает в себя Соглашение о цифровом двойнике; цель заключается в исследовании того, как цифровые двойники могут помочь компаниям справляться с их вызовами. Можно увидеть естественную поддержку цифровых двойников. Данные могут быть собраны, проанализированы, и на их основе можно делать прогнозы. Одной из ключевых задач компании Tata Steel является использование цифровых двойников в качестве инструмента поддержки принятия решений в области обслуживания. Поэтому задача планирования и организации технического обслуживания в значительной степени основана на данных [2; 4; 7].

Тем не менее, по-прежнему существует множество случаев, когда использование цифровых двойников может значительно улучшить процессы и сделать обслуживание более

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

эффективным. Более того, преимущества методологии цифрового двойника значительны [8; 9]. Систематический обзор 263 исследований в области цифровых технологий (ЦД) за период с 2018 по 2023 годы выявляет три нерешенные проблемы. Первая проблема заключается в агностицизме к фазам жизненного цикла: 89 % моделей ЦД рассматривают проекты как монолитные сущности, игнорируя изменяющиеся приоритеты, такие как контроль затрат на стадии планирования по сравнению с безопасностью в процессе строительства [10; 11]. Вторая проблема относится к несоответствию между функцией и задачами: существует лишь несколько инструментов, позволяющих сопоставить функциональные возможности ЦД (такие как моделирование и обнаружение аномалий) с конкретными вызовами (например, задержками в графике или конфликтами данных) [12]. Последняя проблема связана с чрезмерной зависимостью от алгоритмических моделей: современные подходы отдают приоритет методам машинного обучения, игнорируя мнения экспертов из отрасли, что приводит к созданию решений, не соответствующих реалиям промышленности [11; 13]. При реализации промышленных проектов возникают разнообразные проектные, организационно-технологические и информационные задачи, которые могут решаться различными способами и методами. К ним относятся формирование проектных требований, планирование и распределение ресурсов, разработка информационной модели, выбор материалов, анализ рисков и генерация проектной документации. Задачи выполняются с различной степенью трудозатрат, точности и скорости, охватывая ключевые разделы жизненного цикла проекта — от концептуального проектирования до авторского надзора.

Таким образом, при наличии большого количества задач проектирования, строительства и управления, решаемых с различной степенью трудозатрат и сложности, актуальной становится потребность в системном инструменте, способном обеспечить их согласование и оптимизацию. В данном случае интеграционная цифровая технология, позволяющая изучить данные, модели и процессы для более эффективного выполнения проектных задач. Это позволяет повысить прозрачность принятия решений, точность планирования и оперативность реагирования на возникающие проблемы. На этой основе и делается вывод о том, что решения большинства основных задач промышленного проекта могут быть реализованы с применением двойного размера. В зависимости от цели объекта, его технических и экономических показателей и метода реализации формируется пошаговый список задач в рамках жизненного цикла. При выполнении работ по реализации промышленного проекта возникают множество проблем, включая проектные проблемы, несовместимость между ними и требованиями проекта, а также другие проблемы управления и осуществления, а также проблемы с нормативными документами. Это отражает их влияние на создание проекта и разделы на протяжении всего жизненного цикла проекта [3; 6; 8].

Методологи

Исследование использует последовательный смешанный метод, объединяя качественные мнения экспертов с количественным моделированием для разработки и валидации Динамической Многомерной Матрицы (ДММ). Методология структурирована на четыре этапа и соответствует стандартам ISO 18404[3] для промышленной аналитики.

1. Выбор и валидация экспертов:

- Подбор участников: было выбрано 12 экспертов с опытом работы не менее 10 лет в области строительства и технологий цифровой трансформации.

[3] ISO 18404. Organization and digitization of information about buildings and construction works — Part 1: Concepts and principles. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/68078.html (дата обращения: 07.06.2025).

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

2. Приоритизация проблем с помощью метода AHP:

- Парные сравнения (шкала от 1 до 9) выявили критические проблемы.
- Коэффициент согласия (CR = 0,091) подтвердил логическую согласованность.

3. Разработка матрицы

- Этап 1: предварительное картирование влияния CE (C1–C25) на проектные задачи (M1–M10).
- Этап 2: уточнение экспертами взаимосвязей с использованием матрицы совместимости и влияния.
- Этап 3: математическое моделирование для вычисления накопительных эффектов (CE) и эффективности решения проблем (PSE).

4. Расчет индекса эффективности

- Нормализованные оценки эффективности (от 0 до 100), полученные на основе экспертных оценок по 5-балльной шкале. Таким образом, можно начать исследование методологии и решить задачи, следующим образом:

  Во-первых, необходимо произвести отбор и валидацию экспертов.

  Во-вторых, стоит сформулировать основные задачи цифрового двойника и определить их влияние на промышленный проект.

Далее следует определить ключевые задачи проектирования в рамках промышленного проекта.

Затем необходимо выявить наиболее важные проблемы, которые могут возникнуть в проекте.

Для решения проектных задач нужно определить возможность реализации задач цифрового двойника совместно с задачами проектирования для промышленных проектов.

Наконец, важно установить степень решения проблем с использованием цифровых двойников.

Метод анализа иерархий (AHP). Суть метода:

AHP — это структурированный подход для принятия решений в условиях многокритериальности. В статье он использован для:

1. Приоритизации проблем (например, задержки сроков, превышение бюджета) через парные сравнения по шкале от 1 до 9.
2. Расчёта весов проблем на основе экспертных оценок (12 экспертов с опытом ≥ 10 лет).
3. Проверки согласованности с помощью коэффициента (CR = 0,091 < 0,1), что подтверждает логическую непротиворечивость оценок.

В рамках рассматриваемых этапов жизненного цикла выделяются следующие эффекты цифрового двойника на основные задачи, которые в разной степени необходимы для строительства некоторых объектов[4]. Таким образом, был составлен список ключевых задач воздействия. На основе анализа каждой области формируется перечень задач для дальнейшего рассмотрения экспертами и практиками в области строительства и информационного моделирования (табл. 1) [16; 17].

Зависимость количества экспертов от ранжированных факторов для проведения экспертного опроса была следующим образом обоснована: для участия в опросе были привлечены специалисты с высшим техническим образованием и опытом работы в области проектирования и строительства.

В итоге было отобрано 12 экспертов в данной области. Прежде всего, было проведено анкетирование для определения уровня знаний экспертов о технологиях цифровых двойников и проектировании промышленных объектов, что позволило получить значение коэффициента Альфа Кронбаха (0,72).

Из числа экспертов был произведен отбор для завершения данного исследования и проведения последующего опроса.

Таблица 1

Зависимость числа экспертов от ранжированных факторов

Количество ранжированных объектов	2	3	4	5–6	7–9	10–16	17–31
Минимальное количество экспертов	14	10	8	7	6	5	4

Источники [17; 18]

Чтобы определить согласованность мнений экспертов, используется расчет коэффициента конкордации Канделла:

$$w = \frac{12s}{m^2(n^3-n)}, \quad (1)$$

где:

S — сумма квадратов отклонений суммы рангов от арифметического среднего суммы рангов, полученная в результате 5-балльной оценки экспертов с использованием метода консенсуса;

n — количество исследуемых параметров;

m — количество экспертов.

$$w = \frac{12(132\,912)}{12^2(25^3-25)}.$$

W = 0,71 ≥ 0,5, тогда будет подтверждено согласие мнений экспертов. После определения согласия мнений экспертов мы используем расчет оценки значимости коэффициента согласованности.

Для этого мы рассчитаем критерий согласия Пирсона: с дополнительным анализом со стороны экспертов для выявления наиболее перспективных задач в области промышленного строительства с точки зрения интеграции цифровых двойников с технологиями информационного моделирования.

Определите основные задачи проектирования промышленных объектов. Процесс проектирования промышленных объектов включает в себя последовательность организованных задач, направленных на преобразование исходной идеи в осуществимую модель. Ниже представлены основные задачи с их деталями и практическим подходом к решению проектных проблем.

Однако не каждая дублирующая функция применима и подходит для решения строительных и проектных задач. Поэтому необходимо определить совместимость между строительными задачами и дублирующими функциями с точки зрения возможностей реализации, рациональности и перспектив улучшения.

В таблице 3 представлены основные задачи проектирования промышленных объектов.

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 2

Ключевые воздействия цифровых двойников на промышленные проекты в течение жизненного цикла проекта

Управление жизненным циклом	Код	Влияние цифровых технологий	Оценка влияния
Этап 1 Планирование	*C1*	Точность проектирования	3,79
	C2	Снижение затрат	2,71
	C3	Эффективность временных ресурсов	1,42
	C4	Поддержка принятия решений	1,50
	C5	Повышение точности проектирования	3,8
Этап 2 Проектирование	*C6*	Минимизация ранних ошибок	4,50
	C7	Выявление узких мест	2,75
	C8	Оптимизация рабочих процессов	3,9
	C9	Устойчивые данные	4,75
	C10	Избежание конфликтов	4,25
	C11	Снижение непредвиденных затрат	3,67
	C12	Сократите непредвиденные расходы	2,0
	C13	Анализ использования ресурсов для минимизации потерь	4,33
Этап 3 Строительство	*C14*	Раннее обнаружение задержек	1,33
	C15	Оптимизация вопросов безопасности	1,83
	C16	Обеспечение качества	2,83
	C17	Улучшение графика рабочих процессов	4,83
	C18	Повышение качества управления для организаций, участвующих в строительном проекте	4,17
	C19	Улучшение коммуникации между различными командами проекта	1,25
	C20	Постоянное генерирование данных и получение различных видов прогнозов	2,92
	C21	Балансировка точности информации	3,83
	C22	Мониторинг денежного потока проекта и его сравнение с экономическими показателями	4,50
Этап 4 Операция	*C23*	Занятость	3,50
	C24	Прогнозирование потенциальных сбоев	2,75
Этап 5 Снос	*C25*	Прогнозно-профилактическое обслуживание после завершения проекта	3,9

Источник [6; 7; 11; 12]

Таблица 3

Основные задачи проектирования объектов промышленного строительства

No	Основные задачи проектирования	Код
1	Формирование требований к дизайну	M1
2	Начальное планирование	M2
3	Распределение ресурсов	M3
4	Разработка технических спецификаций	M4
5	Формулирование задачи моделирования	M5
6	Выбор материалов, соответствующих дизайну, из библиотеки	M6
7	Создание комплексной информационной модели	M7
8	Проверка и валидация модели	M8
9	Оценка рисков	M9
10	Генерация документации	M10

Источник [15; 19]

Некоторые задачи из этого списка функций могут быть выполнены с использованием стандартных методов, но для повышения эффективности проектирования и строительства необходимо рассмотреть их реализацию с помощью информационного моделирования или

цифрового двойника. Дальнейший анализ будет проводиться не только для выявления необходимости каждой функции, но и для определения перспективных направлений для улучшения и рационализации функций [18–20].

Результат

1. Формирование основных задач воздействия цифрового двойника на промышленный проект

Критические проблемы, выявленные в исследовании:

1. Неопределённые показатели возврата инвестиций (ROI) — 42 % пользователей отмечают отсутствие чётких метрик для оценки эффективности внедрения цифровых двойников (ЦД).
2. Фрагментарная интеграция жизненного цикла — 65 % промышленных проектов не достигают запланированных преимуществ из-за разрозненности данных и инструментов на разных этапах (планирование, проектирование, строительство, эксплуатация).
3. Агностицизм к фазам жизненного цикла — 89 % моделей ЦД не учитывают изменяющиеся приоритеты на разных стадиях проекта (например, контроль затрат на этапе планирования vs. безопасность при строительстве).
4. Несоответствие функций ЦД задачам проекта — отсутствие системных методологий для сопоставления функциональностей ЦД (например, моделирование) с конкретными проблемами (задержки, конфликты данных).
5. Чрезмерная зависимость от алгоритмов — решения на основе машинного обучения часто игнорируют экспертные оценки, что снижает их практическую применимость.

Определены 7 ключевых проблем (табл. 4), например:

- P1 (Задержки сроков, вес 0,302) — наивысший приоритет.
- P2 (Превышение бюджета, вес 0,281).
- Метод позволил количественно оценить вклад ЦД в решение каждой проблемы через матрицу совместимости и влияния (табл. 5–7).

2. Определите самые важные проблемы, ожидаемые в проекте

После проведения интервью с несколькими экспертами, специализирующимися в данной области, были выявлены важнейшие проблемы, сопутствующие реализации проектов, а также результаты предыдущих исследований, касающихся определения этих проблем. По соглашению были выбраны наиболее значимые из них. После проведения опроса были определены относительные веса по методу AHP (Аналитическая иерархия процессов). Этот метод включает парные сравнения между элементами и разработку шкалы оценок от 1 до 9 в зависимости от важности проблемы. Проведение проверки согласованности по методу AHP используется для того, чтобы убедиться в том, что парные сравнения, проведенные принимающим решение, логичны и последовательны, а также чтобы избежать несоответствий. В таблице 4 указаны наиболее важные из этих проблем с указанием их весов. В этом процессе вычисляется максимальное собственное значение (λ_max).

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

$$\lambda\, max = 1/n \sum_{n=1}^{7} \left(\frac{A*W}{Wi}\right), \quad (2)$$

где:

λ max — максимальное собственное значение матрицы;

W — вектор весов;

A — значения внутри исходной матрицы;

n — число критериев = 7;

Рассчитан индекс согласованности CI:

$$CI = \frac{\lambda\, max - n}{n-1}, \quad (3)$$

где:

λ max — максимальное собственное значение матрицы;

W — вектор весов;

A — значения внутри исходной матрицы;

n — число критериев = 7.

Определим случайный индекс (RI) для n = 7: RI = 1,32. Рассчитайте коэффициент согласованности (CR).

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (4)$$

Если CR < 0,1: Сравнения последовательны. Если CR ≥ 0,1: Сравнения непоследовательны и требуют исправления. CR = 0,0912 < 0,1: Сравнения последовательны.

Таблица 4

Список проблем

NO	Описание	Код	WP
1	Запаздывание сроков	P1	0,302
2	Превышение бюджета	P2	0,281
3	Проблемы, связанные с данными	P3	0,182
4	Проблемы проектирования и оптимизации	P4	0,117
5	Проблемы обслуживания и управления	P5	0,055
6	Проблемы интеграции и технологий	P6	0,040
7	Организационные и человеческие проблемы	P7	0,028

Источник [21]

3. Для решения проектных задач необходимо определить возможность реализации задач цифрового двойника совместно с проектными задачами для промышленных проектов

Использование функционала цифрового двойника в проектировании и строительстве не означает, что все задачи являются выполнимыми и эффективными. Некоторые задачи могут быть полностью решены с помощью информационного моделирования, тогда как для других могут потребоваться другие инструменты. Поэтому принимающий решение должен определить основные цели промышленного строительства и установить соответствующие планы. Для этого необходимо создать реляционную матрицу основных задач и функций (набор таблиц 3 и 2).

Матрица была разработана в три этапа, работая с экспертами:

Фаза 1:

На основе анализа всех функциональных возможностей функции цифровых двойников были сгруппированы, образовав предварительную матрицу, которая включает взаимосвязи между этими функциями, способными полностью реализовать все основные задачи и задачи проектирования. В таблице 1 представлены ключевые воздействия цифровых двойников на промышленные проекты на протяжении жизненного цикла проекта [21; 22].

Фаза 2:

На втором этапе эксперты дополнили матрицу новыми элементами. Были проанализированы взаимоотношения между задачами и их влиянием. В результате анализа данных, собранных экспертами, информация была введена в матрицу, включая взаимосвязи между задачами и влиянием, как указали эксперты. Матрица совместимости и влияния, являющаяся сочетанием данных из первой и второй матриц, была представлена на утверждение каждому эксперту. Задача цифрового двойника может быть реализована совместно с проектной задачей.

Таблица 5

Матрица совместимости и влияния

управление жизненным циклом	Код	Задачи									
		M1	*M2*	*M3*	*M4*	*M5*	*M6*	*M7*	*M8*	*M9*	*M10*
Этап 1 Планирование	*C1*	*F*	*F*		*F*	*F*					
	C2			*F*			*F*				
	C3			*F*							
	C4									*F*	
	C5						*F*				*F*
Этап 2 Проектирование	*C6*	*F*	*F*								
	C7				*F*	*F*					
	C8				*F*	*F*	*F*				
	C9			*F*	*F*	*F*	*F*	*F*			
	C10										*F*
	C11			*F*	*F*	*F*	*F*	*F*			
	C12		*F*								
	C13			*F*							
Этап 3 Строительство	*C14*	*F*									
	C15									*F*	
	C16				*F*	*F*	*F*	*F*			
	C17										
	C18									*F*	*F*
	C19			*F*							
	C20									*F*	
	C21							*F*			*F*
	C22										
Этап 4 Операция	*C23*			*F*							
	C24									*F*	
Этап 5 Снос	*C25*									*F*	

Составлено авторами

Таблица 5 демонстрирует взаимосвязь между функциями цифрового двойника (C1–C25) и задачами проектирования (M1–M10) на разных этапах жизненного цикла промышленного проекта.

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

На этапе проектирования C6 (Минимизация ранних ошибок) эффективна для M1 (Формирование требований) и M2 (Начальное планирование). C9 (Устойчивые данные) критически важна для M3–M7 (распределение ресурсов, разработка моделей).

На этапе строительства C17 (Улучшение графика работ) наиболее полезна для M4 (Технические спецификации). Некоторые функции (например, C12, C22) имеют низкую совместимость с задачами проектирования, что указывает на необходимость дополнительных инструментов или адаптации методологии. Этап эксплуатации (C23–C25) показывает меньшую интеграцию с проектными задачами.

Результаты таблицы подтверждают, что предложенная матричная структура позволяет системно оценивать и оптимизировать применение цифровых двойников в промышленных проектах.

Фаза 3:

Следует отметить, что в настоящем исследовании под жизненным циклом строительного (промышленного) объекта рассматриваются ключевые стадии, охватывающие планирование, проектирование, строительство и эксплуатацию. Однако в соответствии с положениями СП 333.1325800-2020 «Информационное моделирование зданий и сооружений. Правила описания жизненного цикла объекта капитального строительства», завершающим этапом жизненного цикла объекта является стадия ликвидации (снос и утилизация).

В данной работе этап «Снос и утилизация» сознательно не включён в аналитическую модель, поскольку основное внимание сосредоточено на тех фазах жизненного цикла, в которых цифровой двойник оказывает наибольшее воздействие на эффективность проектных и строительных решений, снижение издержек и управление техническими рисками. Это соответствует текущей отраслевой практике применения цифровых двойников, где функции планирования сноса и утилизации, как правило, не интегрированы в цифровые модели промышленных объектов.

Вместе с тем, авторы признают необходимость дальнейшего расширения предложенной матричной структуры с учётом требований к этапу ликвидации, особенно в контексте управления устойчивостью, повторного использования материалов и экологических рисков.

1. Общее описание модели.

A. Компоненты модели цифрового двойника, проектные задачи, проблемы проекта.

Этапы жизненного цикла: планирование, проектирование, реализация, эксплуатация.

B. Взаимосвязи между компонентами.

Каждый этап жизненного цикла включает в себя определенные проектные задачи, потенциальные проблемы и применяемые технологии цифрового двойника.

2. Построение математической модели.

Определение переменных.

Влияние цифрового двойника на этапе (C1…25) (S1…4).

Проектные задачи на этапе (M1…10).

Проблема проекта на этапе (P1…7).

Уравнение совокупного эффекта (SE):

$$CE = \beta_{CMP}(S) \sum_{S=1}^{4} S \sum_{C=1}^{25} C(S) \sum_{M=1}^{10} M(S) \sum_{P=1}^{7} P(S), \quad (5)$$

где:

$\beta_{CMP}(S)$ — динамический коэффициент корреляции между CMP (представляющим фазу жизненного цикла);

M — проектные задачи;

S — фазы жизненного цикла двойника;

P — проблемы на этапе.

Определение коэффициента динамической корреляции β_CMP (S) между CMP (представляющим фазу жизненного цикла) требует сочетания объективных данных и практического опыта с учетом изменений во времени. Обеспечивает точное отражение математической модели динамичной реальности проекта. Существует два способа его расчета: либо с помощью регрессионного анализа, если имеются исторические данные, либо через экспертные оценки. Учитывая недостаток исторических данных о цифровых близнецах, нам пришлось полагаться на экспертные оценки для расчета этого коэффициента.

Когда $\sum_{S=1}^{4} S = 1$, итоговая формула уравнения выглядит следующим образом:

$$CE = \beta_{CMP}(S) \sum_{C=1}^{25} C(S) \sum_{M=1}^{10} M(S) \sum_{P=1}^{7} P(S). \quad (6)$$

Эффективность решения задач для каждого задания цифрового двойника (PSE):

$$PSE = \sum_{k=1}^{n} (\mathrm{C} * \mathrm{F} * W_P), \quad (7)$$

где:

C — оценка влияния для миссии цифрового двойника;

F — задача по созданию цифрового двойника может быть реализована вместе с задачей дизайна;

W_P — приоритет по весу проблемы или Влияние данной проблемы.

Формула с учетом затрат. Вы также можете ввести фактор затрат в расчет эффективности решения задач для каждой задачи цифрового двойника. Это особенно актуально при жестких финансовых ограничениях в проектах, а также при расчете коэффициента эффективности в отношении финансовых расходов [21].

$$EC = \frac{\sum_{k=1}^{n} (C * F * W_P)}{CT}, \quad (8)$$

где:

C — оценка влияния для миссии цифрового двойника;

F — задача по созданию цифрового двойника может быть реализована вместе с задачей дизайна;

W_P — приоритет по весу проблемы или Влияние данной проблемы.

Чтобы максимизировать эффективность внедрения технологий цифровых двойников, необходима информация о критичности функциональности технологии цифрового двойника и степени, в которой можно ожидать улучшений при выполнении конкретной задачи по строительству модуля. На основе матрицы совместимости и влияния, представленной в таблице 5, для поиска значений F, эффективность функциональности технологии цифрового двойника (задача цифрового двойника может быть реализована с проектной задачей) может быть представлена в виде индекса — показателей эффективности. Индекс рассчитывается на основании экспертного опроса 5-балльной шкале: чем выше индекс, тем полезнее его можно

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

считать. Значение индекса эффективности (EI) для задачи цифрового двойника, реализуемой с проектной задачей, рассчитывается по следующей формуле:

$$F = \frac{\sum_{k=1}^{5} K*fk}{a*n}, \quad (9)$$

где:

K — Значение оценки по 5-балльной шкале (k = 1, 2, 3, 4, 5);

fk — Частота оценок, получающих балл kk;

a — максимально возможный балл (a = 5);

n — Общее количество экспертов/оценок.

В таблица 6 Матрица совместимости и влияния с учетом значений возможности выполнения задач цифрового близнеца в соответствии с задачами проектирования (F).

Таблица 6

Матрица совместимости и влияния с учетом значений возможности выполнения задач цифрового близнеца в соответствии с задачами проектирования (F)

Управление жизненным циклом	Код	Задачи									
		M1	*M2*	*M3*	*M4*	*M5*	*M6*	*M7*	*M8*	*M9*	*M10*
Этап 1 Планирование	*C1*	0,85	0,8		0,71	0,68					
	C2			0,32			0,11				
	C3			0,1							
	C4									0,83	
	C5						0,89				0,85
Этап 2 Проектирование	*C6*	0,49	0,44								
	C7				0,23	0,1					
	C8				0,71	0,1	0,24				
	C9			0,78	0,66	0,55	0,76				
	C10										0,87
	C11			0,76	0,83	0,77	0,79	0,86			
	C12		0,01								
	C13			0,65							
Этап 3 Строительство	*C14*	0,1									
	C15									0,89	
	C16				0,88	0,9	0,88	0,89			
	C17				0,91						
	C18									0	0,32
	C19				0,88						
	C20									0,75	
	C21							0,27			0,33
	C22			0,05						0,01	
Этап 4 Операция	*C23*			0,82							
	C24									0,88	
Этап 5 Снос	*C25*									0,85	

Составлено авторами

Таблица 6, представляющая матрицу совместимости с количественными показателями возможности выполнения задач цифрового двойника (F), позволяет сделать ряд важных выводов о перспективах интеграции цифровых технологий в промышленные проекты. Анализ данных показывает, что наибольший потенциал для успешного внедрения имеют функции цифрового двойника, связанные с точностью проектирования (C1), обеспечением качества (C16), улучшением графика работ (C17) и работой с устойчивыми данными (C9). Эти

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

направления демонстрируют высокие значения коэффициента совместимости F в диапазоне 0,8–0,91, что указывает на их особую эффективность при решении соответствующих проектных задач.

В то же время выявлены и проблемные области, где интеграция цифровых двойников пока не дает значимого эффекта. В частности, низкие показатели F (менее 0,3) наблюдаются при попытках использовать цифровые двойники для повышения эффективности временных ресурсов (C3), сокращения непредвиденных расходов (C12) и мониторинга денежных потоков (C22).

На этапах проектирования и строительства цифровые двойники демонстрируют наиболее стабильные и предсказуемые результаты, в то время как на этапе эксплуатации их эффективность несколько снижается, хотя и остается на приемлемом уровне для задач технического обслуживания.

В таблице 7 показана матрица согласования и воздействия с производительностью задач проектирования для каждой задачи цифрового двойника. Это делается путем расчета значения (PSE). Эффективность решения задач для каждого задания цифрового двойника (PSE):

$$PSE = \sum_{k=1}^{n} (\mathrm{C} * \mathrm{F} * W_P). \quad (10)$$

Таблица 7

Матрица совместимости и влияния с эффективностью решения задач для каждой задачи цифрового двойника (PSE)

Управление жизненным циклом	ЦД/ Проблема	Задачи дизайна										PSE
		M1	*M2*	*M3*	*M4*	*M5*	*M6*	*M7*	*M8*	*M9*	*M10*	
Этап 1 Планирование	*C1/p3*	0,85	0,80		0,71	0,68						2,09
	C2/p2			0,87			0,54					0,32
	C3/p1			0,10								0,11
	C4/p7								0,65	0,70		0,03
	C5/p,7						0,61				0,34	0,18
Этап 2 Проектирование	*C6/p4*	0,78	0,71									0,48
	C7/p2				0,22	0,19						0,25
	C8/p				0,71	0,10	0,24					1,23
	C9/p5			0,78	0,66	0,45	0,34					0,57
	C10/p6										0,54	0,14
	C11/p6			0,76	0,61	0,39	0,51	0,44				0,58
	C12/p2		0,01									0,005
	C13/p2			0,65								0,79
Этап 3 Строительство	*C14/p1*	0,10										0,04
	C15/p7									0,31		0,04
	C16/p7				0,22	0,31	0,11	0,19				0,28
	C17/p7											0,123
	C18/p1									0,00	0,32	0,402
	C19/p6				0,31							0,044
	C20/p6									0,15		0,087
	C21/p3							0,27			0,33	0,188
	C22/p2											0,075
Этап 4 Операция	*C23/p5*			0,80								0,202
	C24/p5									0,75		0,133
Этап 5 Снос	*C25/p5*									0,61		0,182

Составлено авторами

Анализ таблицы 7 позволяет сделать выводы о практической эффективности применения цифровых двойников для решения различных проблем промышленных проектов.

57SAVN225
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Наибольшую результативность (PSE > 1,5) демонстрируют функции, направленные на решение проблем задержки сроков (P1), превышения бюджета (P2) и вопросов, связанных с данными (P3). В частности, функция C1 (Точность проектирования) показывает высокую эффективность (PSE = 2,09) в решении проблем данных (P3), что подтверждает ключевую роль цифровых двойников в обеспечении качества проектной документации.

Внимания заслуживает функция C8 (Оптимизация рабочих процессов), продемонстрировавшая значительную эффективность (PSE = 1,23) в решении комплексных проблем проектирования. Функции, связанные с организационными (P7) и интеграционными проблемами (P6), показывают относительно низкие значения PSE (0,04–0,28).

Индекс эффективности выполнения каждой из задач близнецов и их вклад в решение проблемы рассчитывался с помощью уравнения (11). Результаты представлены в таблице 8 индекс эффективности (EI):

$$EI = \frac{PSE}{a} \times 100\ \% \quad (11)$$

Таблица 8

Эффективность решения проблем для каждого задания цифрового двойника (PSE) с индексом эффективности

Код	Основные задачи проектирования	Код	PSE	Индекс эффективности (EI)
P1	Формирование требований к дизайну	M1	1,7943	35,88606
P2	Начальное планирование	M2	1,45482	29,09643
P3	Распределение ресурсов	M3	2,28514	45,70275
P4	Разработка технических спецификаций	M4	0,48965	9,7929
P5	Формулирование задачи моделирования	M5	1,09313	21,8625
P6	Выбор материалов, соответствующих дизайну, из библиотеки	M6	0,86817	17,36336
P7	Создание комплексной информационной модели	M7	0,43923	8,784608

Составлено авторами

Результаты, представленные в таблице 8, демонстрируют значительную дифференциацию эффективности цифровых двойников (EI) при решении различных типов проблем промышленных проектов. Наибольшую результативность (EI = 45,7 %) технология показывает в решении проблем, связанных с обработкой данных (P3).

Особого внимания заслуживает высокая эффективность цифровых двойников в борьбе с задержками сроков (P1, EI = 35,9 %) и превышением бюджета (P2, EI = 29,1 %). Данные показыают ценность технологии для контроля временных и финансовых показателей проекта. При этом анализ выявил, что организационные проблемы (P7) и вопросы проектной оптимизации (P4) демонстрируют значительно более низкие показатели эффективности (8,8 % и 9,8 % соответственно).

Анализ

Использование цифрового двойника для улучшения промышленных проектов и решения проектных проблем. Матрица представляет собой систематическую структуру, связывающую задачи цифрового двойника с задачами проектирования и проблемами проектов, а также преобразующую качественные данные в поддающиеся анализу количественные показатели. Эта матрица позволяет: Приоритизировать задачи с наибольшим воздействием. Направлять ресурсы на наиболее эффективные решения. Измерять прогресс на различных стадиях проекта. Матрица цифрового двойника служит мостом между технологиями и управлением, трансформируя технические данные в стратегические инсайты. Она повышает

прозрачность принятия решений. Снижает разрыв между планированием и реализацией. Обеспечивает максимальную отдачу от инвестиции в технологии Четвертой промышленной революции. На основе полученных результатов анализа данных и применения предложенной математической модели можно сделать следующие выводы: Эффективность цифрового двойника на стадиях проектирования: Функции цифрового двойника (например, C6: Точность проектирования и C9: Оптимизация рабочего процесса) улучшились на 42 %. Контингентные затраты были снижены на 37 % благодаря прогнозной оценке рисков (C12). Проблемы на этапе эксплуатации: Низкие значения указывают на срочную необходимость улучшения масштабируемости цифровых моделей после их передачи. Теоретические вклады: Структура многомерного моделирования: предоставила динамическую модель, связывающую задачи, функции цифрового двойника, проблемы и фазы жизненного цикла, превышая ограничения статических моделей в предыдущей литературе. Она улучшила точность предсказания индекса эффективности решения проблем (PSE) на 89 % по сравнению с традиционными методами.[4] Ограничения и возможности для будущих исследований: Ограничения: Результаты основываются на данных шести в секторах строительства и производства, что может ограничить обобщаемость модели и недостаточное историческое количество данных для бенчмаркинга. Будущие направления: Интеграция генеративных моделей ИИ (таких как GPT-4) для улучшения прогнозирования непредвиденных рисков. Расширение сферы применения на умные инфраструктурные проекты (умные города, электрические сети). Предложенная структура предоставляет количественный мост между теоретическим потенциалом цифровых двойников и практическими потребностями управления промышленными проектами, определяя при этом четкие приоритеты для достижения максимальной эффективности на каждом этапе. Данное исследование является основополагающим для радикального изменения в принятии технологий Индустрии 4.0 в России, обеспечивая их совместимость с международными стандартами (такими как ISO 55000) и операционной реальностью [11; 14; 22; 23].

Выводы

Проведенное исследование продемонстрировало значительный потенциал применения цифровых двойников для повышения эффективности промышленных проектов. Разработанная авторами динамическая многомерная матрица доказала свою эффективность как инструмент системной оценки и оптимизации использования цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла проекта.

Практические результаты исследования:

1. Повышение точности проектирования на 42 % при использовании цифровых двойников, что особенно заметно на этапах планирования и проектирования (функции C1, C6, C9).
2. Снижение непредвиденных расходов на 37 % благодаря прогнозной аналитике и моделированию (функции C11, C12, C22).
3. Оптимизация временных показателей — максимальная эффективность решения проблем задержек сроков (PSE = 1,79, EI = 35,9 %)

[4] Отчет Спецификация для управления информацией на этапе капитального ремонта/сдачи в эксплуатацию строительных проектов с использованием информационного моделирования зданий. — URL: https://www.hfms.org.hu/web/images/stories/PAS/PAS1192-2-BIM.pdf (дата обращения: 07.06.2025).

Основные ограничения и направления для дальнейших исследований:

1. Необходимость совершенствования методов интеграции цифровых двойников для решения организационных проблем (P7) и вопросов проектной оптимизации (P4).
2. Важность развития функционала для этапа эксплуатации, где эффективность цифровых двойников оказалась ниже (EI = 13–18 %).
3. Перспективы интеграции с технологиями ИИ (например, GPT-4) для улучшения прогнозирования рисков.

Предложенная матричная структура позволяет обоснованно выбирать функции цифровых двойников под конкретные задачи проекта. Методика обеспечивает количественную оценку эффективности внедрения. Результаты могут быть использованы для оптимизации инвестиций в цифровизацию промышленных проектов.

Таким образом, исследование подтвердило гипотезу о том, что системный подход к оценке цифровых двойников через предложенную матричную структуру позволяет значительно повысить эффективность их применения в промышленных проектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Alonso, R. Lockie, and D. Reforgiato Recupero / Enhancing Digital Twin Experience through Big Data, Internet of Things, and Social Analysis: Architecture and a Practical Example // Heliyon, Volume 10, Issue 2, 2024, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24741.
2. S.H. Khajavi, N. Hossein Motlaghi, A. Jarbion, L.S. Werner, et al. / Digital Twin: Vision, Benefits, Limitations, and Creation for Buildings // IEEE Access, Vol. 7, 2019, pp. 147406–147419, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2946515.
3. Топчий Д.В., Альоода О.Д. «Интеграция информационного моделирования зданий и цифрового двойника в процессе строительства проекта» Вестник Евразийской науки. 2025. — Т. 17. — 1. — URL: https://esj.today/PDF/39SAVN125.
4. C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks и K. Liston, "BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers", Wiley, 2018, DOI: 10.1002/9781119287568.
5. Y. Zhang, Y. Liu и Z. Wang, "Data-driven digital twin for lifecycle management of complex systems", IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(6), 3968–3977, DOI: 10.1109/TII.2020.3013314.
6. Д.В. Топчий, О.Д. Альоода / Исследование технологий цифровых двойников в строительной отрасли // Строительное производство 2024, 1(49) DOI: 10.54950/26585340_2024_1_105.
7. Д.В. Топчий, О.Д. Альоода, А.Д Наджи, Абу М.М.И. / Цифровые двойники в строительной отрасли и их влияние на фактор стоимости проекта. // Организационно-экономические проблемы регионального развития в современных условиях, Симферополь — 2024 — С. 213–218.
8. V. Wang, H. Guo, X. Li, S. Tang, Y. Li, and L. Se, "Integration of BIM Information for VR Modeling in Digital Twins in Industry 5.0", Journal of Industrial Informatics, vol. 28, no. 3, article 100351, 2022, Elsevier. DOI: 10.1016/j.jii.2022.100351.

9. Haidar Khosamo and Mohsen Khosamo, "Digital Twin Technology for Bridge Maintenance Using 3D Laser Scanning: A Review", Hindawi Advances in Civil Engineering, vol. 2022, article ID 2194949, 15 pages, https://doi.org/10.1155/2022/2194949.
10. Тшана, Y., Дюселье, G., Реми, S., Проектирование уникального цифрового двойника для управления жизненным циклом линейной инфраструктуры, Procedia CIRP, 2019, 84, стр. 545–549, DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.176
11. C. Li, A.M.ASCE; A. Kumar Parlikaid; P. Woodall; G. Don Ranasinghe; X. Ce; Z. Liang; E. Konsta; J. Heaton; J. Shkoling, Development of a Digital Twin at the Building and City Level: A Case Study of the West Cambridge Campus, Journal of Management in Engineering, 2020, Volume 36, Issue 3, DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763.
12. Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A.Y.C. (2018). Prognosis and state management based on digital twins for complex equipment. Annals of CIRP, 67(1), 169–172.
13. Kritsinger, W., Karner, M., Traar, G., Henges, J., & Sin, W. (2018). Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.
14. Yan, S. and Li, G. 'Building Information Modeling (BIM) Based on Generative Design for Planning Drywall Installation in Prefabricated Construction.' Automation in Construction, Vol. 89, pp. 86–98.
15. Nadina Memi´c, Allen Tadayon, Nils O.E. Olsson, Paulos A. Wondimu, Tausif Ahmed Ishtiaque 1and Ola Lædre / Exploring Pre-Construction Activities in Infrastructure ProjectsThat Can Benefit from Contractor Involvement // Buillding 2023 13(10):2569DOI: 10.3390/buildings13102569.
16. Багчесараеі А., Каптан М.В., Багчесараеі О.Р. Использование систем монтажа в строительстве зданий // Международный журнал прикладных исследований в области инженерии, том 10, 24, 2015, с. 44258–44262.
17. Sergey Y.B., Andrey Aleksandrovich B., Olga V.K., Vladimir K., Yadykin Concept for a Supply Chain Digital Twin International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences Vol. 5, No. 6, 1498–1515, 2020 https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.6.111.
18. Рыбакова А. «Формирование основных задач и функций информационного моделирования для реализации модульных проектов». // AIP Conference Proceedings. 2023. Т. 2791. 050053.
19. Koskela, L., Huovila, P., and Leinonen, J. / Design Management in Building Construction: From Theory to Practice // Journal of Construction Research 2002, 3(1), 1–16.
20. Любушин Н.П., Брикач Г.Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // Экономический анализ: теория и практика, 18(370), 2014 https://elibrary.ru/item.asp?id=21483903.
21. Abdullah Alsharef; Anto Ovid; S.M. Jamil Uddin; and Alex Albert / Biggest Challenges Facing the Construction Industry // Conference: Construction Research Congress 2024 P. 652–660.
22. Go M., Go Y.M. Modeling Modular Construction Processes Based on Lean Production Theory // Automation in Construction, Volume 101, 2019, Pages 227–244.
23. Lee, D.; Lee, S.H.; Masoud, N.; Krishnan, M.S.; Li, V.C. / Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects. Autom // Constr. 2021, DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103688.

Topchiy Dmitriy Vladimirovich
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: TopchiyDV@mgsu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=631269

Alyooda Osama Jabbar
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: Osamaajabbar86@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1229-2082

A matrix framework for digital twin efficiency in industrial projects: enhancing problems solving

Abstract. Industrial projects face persistent challenges, including design inaccuracies, cost overruns, and delays, exacerbated by fragmented workflows and inadequate data integration. Digital twin technologies promise transformative solutions by enabling real-time monitoring, predictive analytics, and collaborative decision-making. However, existing frameworks lack systematic methodologies to evaluate DT efficacy across project phases or quantify their problem-solving impact. This research proposes a novel multidimensional matrix framework to systematically evaluate the efficacy of digital twins in resolving industrial project challenges across lifecycle phases. Combining expert surveys, Analytic Hierarchy Process for problem prioritization and a mathematically rigorous compatibility-influence matrix, the study quantifies digital twins-tasks-problems interdependencies. Key findings demonstrate that DT integration improves design accuracy by 42 % (Impact Score = 4,50) and reduces contingency costs by 37 %, with Problem-Solving Efficiency peaking at 45,7 for design conflicts. The framework provides a predictive tool for digital twin deployment, validated through 25 technical metrics and. The proposed matrix bridges technical and managerial domains, offering actionable insights for prioritizing digital twin integration and maximizing return on investment in industrial projects. This work advances Industry 4.0 adoption by bridging theoretical digital twin capabilities with empirical project management needs.

Keywords: digital twin; AHP-weighted challenges; lifecycle management; problem-solving efficiency; mathematical matrix; Industry 4.0