

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/11SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/11SATS226 (<https://doi.org/10.15862/11SATS226>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Воронков О. Н., Валиев Ш. Н. Интеграция информационных моделей в систему технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений / О. Н. Воронков, Ш. Н. Валиев // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/11SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/11SATS226.

For citation:

Voronkov O.N., Valiev Sh.N. Integration of information models into the system of maintenance and repair of bridge structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 11SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/11SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/11SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.21

Воронков Олег Николаевич

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия

Аспирант

E-mail: voronkov.kubstu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4178-4626>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1315614

Валиев Шерали Назаралиевич

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия

Заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и строительные конструкции»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: vshn2014@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6326-2233>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=284723

Интеграция информационных моделей в систему технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений

Аннотация. В статье предложена модель системы интеграции технологий информационного моделирования в процессы технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений на стадии эксплуатации. Модель рассматривает эксплуатацию как замкнутый контур преобразования информации: от контролируемых параметров и результатов осмотров и диагностики к структурированию данных в информационной модели, оценке и прогнозированию технико-эксплуатационного состояния, формированию эксплуатационной ситуации и выбору управленческих воздействий по критерию минимизации совокупных потерь. Введены уровни интеграции, включающие объект, контролируемые параметры, диагностику, информационную модель, оценку и прогнозирование, ситуацию и решение, а также операторы переходов между ними, обеспечивающие прослеживаемость данных и воспроизводимость решений. Предложен перечень групп контролируемых параметров, включающий геометрические, дефектные, динамические, транспортные и климатические характеристики, и показан подход к формированию интегрального индекса состояния элементов на основе нормирования и весовой свёртки показателей. Для иллюстрации работоспособности контура приведён числовой пример одного цикла управления. Представленная модель может использоваться как методическая

основа для построения цифровых контуров эксплуатации и последующей реализации цифровых двойников мостовых сооружений. Отмечены условия применимости модели: регламентация состава измерений, качество и периодичность наблюдений, методическое обоснование пороговых значений ситуаций и весовых коэффициентов, а также организация обновления атрибутивной части информационной модели после выполнения работ. Показано, что переход от фиксации дефектов к управлению по состоянию достигается за счёт формализации обратных связей и унификации представления данных, что особенно важно при эксплуатации парка сооружений и распределении ограниченных ресурсов.

Ключевые слова: мостовые сооружения; эксплуатация; технологии информационного моделирования; техническое обслуживание; ремонт; индекс состояния; ситуационное управление; цифровой двойник

Введение

Современное состояние парка мостовых сооружений характеризуется высокой степенью износа, увеличением транспортных нагрузок и усложнением условий функционирования транспортной инфраструктуры. Поэтому традиционные подходы к техническому обслуживанию и ремонту, основанные на регламентированных схемах надзора демонстрируют ограниченную эффективность, низкую адаптивность и слабую формализуемость [1; 2].

Хотя надзор и обеспечивает выявление дефектов, однако при этом неизбежно приводит к принятию реактивных решений и реализует принятие управленческих решений «по факту». Для повышения эффективности процесса эксплуатации необходимо развивать проактивные подходы, предусматривающие эффективное управление актуальными для объекта рисками, обеспечивая максимальную безопасность, надежность и долговечность.

Таким подходом может служить применение технологий информационного моделирования (ТИМ). В настоящий момент отмечается необходимость развития цифровых контуров эксплуатации, позволяющих обосновывать планирование работ по содержанию мостовых сооружений на основе данных наблюдений [2; 3].

В последние годы ТИМ активно развиваются и уже показали высокую эффективность на стадиях проектирования и строительства. Однако их применение на стадии эксплуатации жизненного цикла мостовых сооружений в настоящее время остается по большей части фрагментарным и распространено в основном за рубежом [1; 4].

В контексте эксплуатации мостовых сооружений предлагается рассмотреть ТИМ-технологии как единое информационное ядро, позволяющее связать натурно измеряемые параметры, результаты диагностик и обследований, оценку и прогноз технико-эксплуатационного состояния (ТЭС), ситуационную интерпретацию и принятие решений [6].

Таким образом, **цель настоящей статьи** — разработка и обоснование модели системы интеграции ТИМ-моделей в процессы технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений, обеспечивающей формализованное, замкнутое и адаптивное управление ТЭС на основе контролируемых параметров.

Основные решаемые задачи:

1. Сформировать и классифицировать некоторый возможный перечень контролируемых параметров мостового сооружения на стадии эксплуатации.
2. Формализовать структуру системы эксплуатации мостового сооружения как многоуровневого информационно-управляющего контура.
3. Разработать модель системы интеграции ТИМ в процессы технического обслуживания и ремонта.

В работе использованы положения системного анализа и кибернетического представления управления; вероятностно-статистических методов; многокритериального выбора решений и оптимизации; математического моделирования.

В основе интеграции ТИМ-моделей в систему технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений лежит перечень контролируемых параметров, характеризующих ТЭС сооружения. Конструкции мостов, как правило, имеют определенный перечень параметров, значения которых должны находиться в некоторых пределах.

Границы устанавливаются и назначаются на этапе проектирования сооружения в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Отклонения этих параметров за пределы установленных границ будет с большой долей вероятности свидетельствовать о нарушении нормальной работы конструкции.

В настоящей статье предлагается рассматривать следующие возможные контролируемые параметры (табл. 1) [8–21]:

Таблица 1

Перечень контролируемых параметров мостовых сооружений

Группа параметров	Измеряемые параметры	Источник данных
Геометрические (p_1)	прогибы, осадки, смещения, крен, углы наклона и др.	геодезия, датчики, сканирование
Дефекты (p_2)	ширина раскрытия трещин, глубина, сколы, оголение и коррозия арматуры, деградиационное разрушение бетона и др.	осмотры, диагностики, обследования
Динамические (p_3)	собственные частоты колебаний, ускорения	акселерометры, вибродиагностика
Транспортные нагрузки (p_4)	интенсивность и состав транспортного потока, масса, перегруз	видео, автоматические системы фиксации транспортного потока, пункты весогабаритного контроля
Окружающая среда (p_5)	температура, влажность, климатические воздействия, паводок	метеостанции, датчики температуры, гидрометрические посты
.		
.		
.		
(p_n)	...	...

Разработано авторами

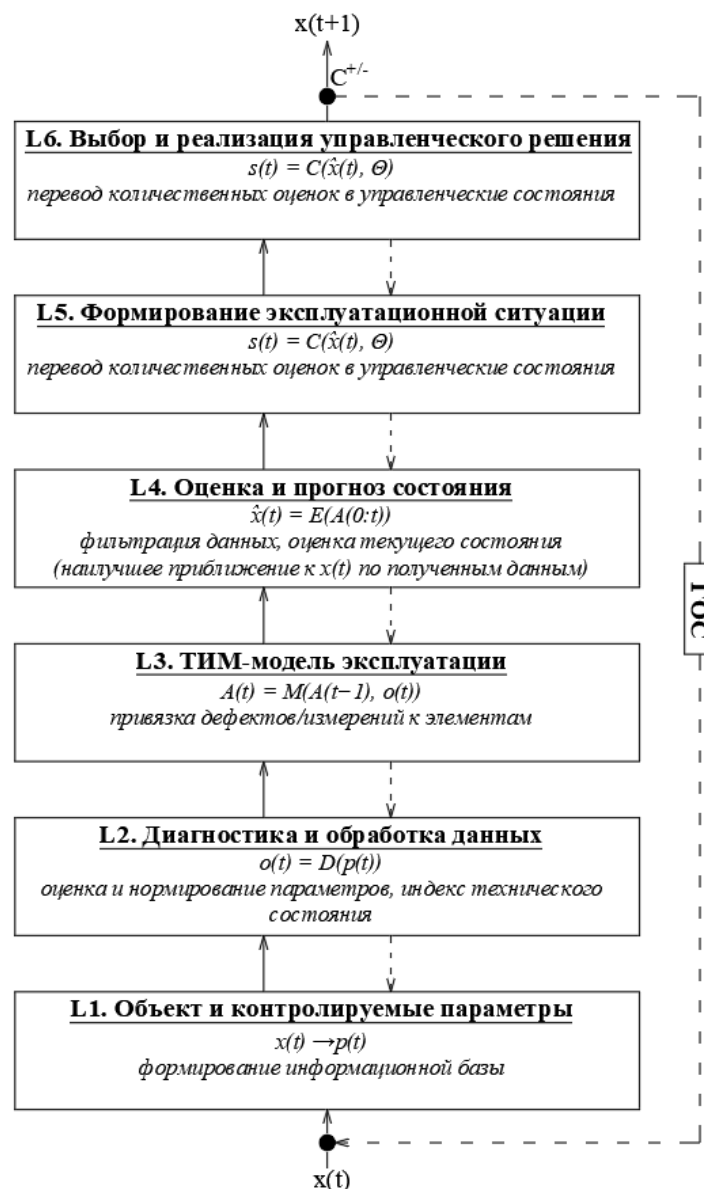
Указанные параметры формируют вектор наблюдаемых величин или вектор контролируемых параметров $p(t)$, образуя первичное информационное пространство эксплуатации:

$$p(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\}, \quad (1)$$

Эксплуатация мостового сооружения рассматривается как замкнутый управленческий цикл преобразования информации, в котором осуществляется переход: физическое состояние $\rightarrow$ данные $\rightarrow$ интеграция $\rightarrow$ анализ и принятие решений $\rightarrow$ управляемые воздействия $\rightarrow$ новое физическое состояние.

При этом ТИМ-модель обеспечивает непрерывность и связность этого процесса, являясь памятью и контекстом эксплуатации: обеспечивает привязку данных к конструктивным элементам, хранение информации об объекте и истории изменений, контроль версий, доступность для участников и формирование цифрового паспорта сооружения.

Модель интеграции ТИМ в систему технического обслуживания и ремонта предлагается реализовать в виде кибернетической модели системы с главной обратной связью (рис. 1) в контексте повышения эффективности работ по содержанию мостовых сооружений на стадии эксплуатации их жизненного цикла:



$x(t) \in X$ — истинное исходное состояние сооружения; $x(t+1)$ — состояние после воздействия; ГОС — главная обратная связь; $C^{+/-}$ — результат

Рисунок 1. Кибернетическая модель системы интеграции ТИМ в процессы технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений (разработано авторами)

В рамках модели мостовое сооружение рассматривается как объект управления, а система эксплуатации — как управляющая система, функционирующая в условиях неполной информации и внешних ограничений.

Управление осуществляется путём последовательного прохождения информации через функциональные уровни модели и возврата управляющих воздействий на объект.

Процесс реализуется циклически и продолжается до достижения согласованного состояния между фактическим ТЭС сооружения, заданными эксплуатационными целями и допустимыми ресурсными ограничениями.

Определим единый контур преобразования информации. Пусть $x(t)$ — истинное исходное состояние сооружения, а $p(t)$ — вектор контролируемых параметров. Тогда функционирование системы задаётся цепочкой операторов:

$$\begin{array}{ccccccc} x(t) & \xrightarrow{G} & p(t) & \xrightarrow{D} & o(t) & \xrightarrow{M} & A(t) & \xrightarrow{E} & \\ & \xrightarrow{\quad} & \hat{x}(t) & \xrightarrow{C} & s(t) & \xrightarrow{P} & a(t) & \xrightarrow{F} & x(t+1), \end{array} \quad (2)$$

где:

G — измерение параметров;

D — диагностика и вычисление показателей;

M — структурирование в ТИМ;

E — оценка состояния;

C — ситуационная классификация;

P — выбор решения;

F — эффект решения (управляющее воздействие) на состояние;

t — дискретный шаг управления (например, месяц/квартал);

$x(t) \in X$ — истинное исходное состояние сооружения;

$p(t) \in P$ — вектор контролируемых параметров (измерения);

$o(t) \in O$ — показатели, нормированные параметры;

$A(t)$ — атрибутивное состояние ТИМ-модели (значения параметров, дефектов);

$\hat{x}(t)$ — оценка текущего состояния (наилучшее приближение к $x(t)$ по полученным данным);

$s(t) \in S$ — эксплуатационная ситуация;

$a(t) \in A$ — управленческое решение (набор действий по техническому обслуживанию и ремонту).

Ниже приведено математическое описание уровней как операторов.

Уровень $L1$ (объект $\rightarrow$ параметры измерений, оператор G):

На первом уровне находится мостовое сооружение как физический объект. Его реальное техническое состояние напрямую недоступно для наблюдения и проявляется через совокупность измеряемых параметров: деформации, повреждения, разрушения, иные дефекты и т. д. Смысл данного уровня заключается в формировании информационной базы эксплуатации, отражающей фактическое состояние конструкций.

Измерения формируются оператором G как отображение истинного состояния в пространство параметров с учётом контекста и погрешностей измерений:

$$p(t) = G(x(t), \eta(t)) + v(t), \quad (3)$$

где:

$v(t)$ — погрешности измерений;

$\eta(t)$ — внешний контекст (например, температура, погодные условия и т. д.). Внешний контекст включает природно-климатические и эксплуатационные факторы, влияние которых на мостовые сооружения рассматривается в отечественных исследованиях [18].

Уровень $L2$ (параметры измерений $\rightarrow$ диагностика, оператор D):

На втором уровне осуществляется преобразование первичных натурных измерений в диагностические показатели. Здесь полученные данные приводятся к единому виду, нормируются, классифицируются и интерпретируются с точки зрения влияния на несущую способность, долговечность конструкций и безопасность эксплуатации.

Результатом работы уровня является формирование обобщённых показателей состояния элементов, в том числе индексов технического состояния.

Смысл данного уровня — переход от натурно измеренных параметров к структурированному и нормированному инженерному описанию $o(t)$:

$$o(t) = D(p(t)), \quad (4)$$

Содержательно оператор D включает четыре шага:

1. Фильтрацию выбросов и ошибок измерений.
2. Нормирование параметров по допустимым/предельным значениям.
3. Агрегирование по элементам и конструктивным параметрам.
4. Формирование интегральных индексов состояния.

Пусть $p_i(t)$ — отдельный параметр (например, прогиб балки), а p_i^{lim} — его допустимое предельное значение. Тогда вводится нормированная функция пригодности:

$$\varphi_i(p_i) = \max\left(0, 1 - \frac{p_i}{p_i^{lim}}\right), \quad (5)$$

где:

$$\varphi_i(p_i) \in [0; 1];$$

$\varphi_i = 1,0$ — параметр в нулевом проявлении;

$\varphi_i = 0$ — параметр достиг предела или превысил его.

Для практического применения модели необходимо перейти от множества разнородных параметров к обобщённым показателям, удобным для принятия решений. В рассматриваемой модели в качестве такого показателя предлагается использовать индекс технического состояния элемента I_e .

Индекс состояния элемента вводится как безразмерная величина в диапазоне $[0; 1]$, где:

$I_e = 1,0$ — полностью исправное состояние;

$I_e = 0$ — неработоспособное состояние.

$$I_e(t) = \sum_{i=1}^m w_i * \varphi_i * (p_i(t)), \sum_{i=1}^m w_i = 1, \quad (6)$$

где:

m — число учитываемых параметров элемента;

w_i — весовые коэффициенты параметров.

$I_e(t) \in [0; 1]$ и характеризует уровень сохранности элемента: чем значение ближе к 1,0 тем состояние элемента ближе к проектному состоянию, чем ближе к 0, тем элемент дефектнее.

Весовые коэффициенты w_i могут задаваться экспертно, а также на основе анализа повреждений сооружений-аналогов, а затем калиброваться на архивных данных (как часто при данном наборе параметров требовалось вмешательство и какой эффект получали).

Уровень L3 (диагностика → ТИМ, оператор M):

На третьем уровне информация интегрируется в ТИМ-модель мостового сооружения. ТИМ при этом выступает как структурированное информационное пространство, в котором каждому конструктивному элементу сопоставлены его геометрия, атрибуты, история изменений и текущее состояние. Фиксация результатов осмотров и выполненных работ в атрибутивной части ТИМ обеспечивает воспроизводимость выводов и сопоставимость данных между циклами наблюдений [2; 7].

Практика создания и сопровождения цифровых моделей мостовых сооружений в отечественных публикациях также рассматривается как основа для последующего информационного сопровождения на протяжении всего жизненного цикла конструкций [8].

Данный уровень обеспечивает:

- накопление эксплуатационного опыта;
- сохранность информации при смене эксплуатирующей организации;
- возможность анализа состояния во времени.

Смысл уровня — обеспечение целостности и непрерывности информации.

Интеграция в ТИМ задаётся оператором M , который сопоставляет диагностические результаты конкретным элементам и атрибутам модели. Таким образом, оператор M внедряет информацию в цифровую среду [17]:

$$A(t) = M(A(t - I), o(t)), \quad (7)$$

На практике это означает, что индексы, дефекты, фото и иные документы, привязанные к конкретным элементам моста, фиксируются и сохраняются в ТИМ-модели.

Уровень $L4$ (ТИМ → оценка и прогноз, оператор E):

На четвёртом уровне осуществляется оценка текущего уровня ТЭС и прогноз его изменения во времени. Используя данные ТИМ-модели и накопленную статистику, формируются выводы о тенденциях деградации, остаточном ресурсе и возможных сценариях развития состояния сооружения [9–12; 16].

Смысл уровня — переход от сохранения фактических данных к прогнозному-аналитическому управлению.

На данном уровне система отвечает на следующие вопросы: «Каково наиболее вероятное текущее состояние?» и «Как оно изменится при разных сценариях эксплуатации?».

Диагностические показатели не равны физическому состоянию. Поэтому на уровне оценки формируется оценка $\hat{x}(t)$ из накопленных ТИМ-атрибутов:

$$\hat{x}(t) = E(A(0:t)), \quad (8)$$

Уровень $L5$ (оценка → эксплуатационная ситуация, оператор C):

На пятом уровне результаты оценки и прогноза интерпретируются в виде эксплуатационной ситуации. Состояние сооружения классифицируется как соответствующее нормативным требованиям либо требующее корректирующих мероприятий.

Смысл уровня — перевод количественных оценок в управленческие состояния.

Оператор ситуационной классификации C переводит непрерывные оценки в дискретные ситуации, понятные для регламентов и принятия управленческих решений:

$$s(t) = C(\hat{x}(t), \Theta), \quad (9)$$

где:

$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ — набор пороговых значений (граничные условия).

Тогда

$$s(t) = \begin{cases} s_0, I_e(t) \geq \theta_1 - \text{нормативное состояние;} \\ s_1, \theta_2 \leq I_e(t) < \theta_1 - \text{ухудшение состояния;} \\ s_2, \theta_3 \leq I_e(t) < \theta_2 - \text{необходимость ремонтных мероприятий;} \\ s_3, I_e(t) < \theta_3 - \text{критическое состояние.} \end{cases} \quad (10)$$

Пороги Θ задаются экспертной оценкой и уточняются по критичности объекта (категория дороги, последствия отказа/аварии и др.) и могут подвергаться корректировке.

Уровень $L6$ (эксплуатационная ситуация $\rightarrow$ управленческое решение, оператор P):

На шестом уровне формируются управленческие решения по техническому обслуживанию и ремонту: выбор вида работ, сроков, объёмов и приоритизация объектов. Решения принимаются с учётом эксплуатационной ситуации, прогнозов состояния и существующих ограничений.

Реализация решений приводит к изменению физического состояния мостового сооружения, что замыкает текущий цикл управления (прохождения информации через уровни модели) и инициирует новый.

Смысл уровня — активное воздействие на ТЭС и реализация управления, принятие оптимальных управленческих решений.

Выбор решения P реализует многокритериальный выбор действия $a(t)$ с учётом ситуации, прогноза и ограничений. Тогда решение выбирается как минимум функции потерь [13]:

$$a(t) = P(s(t), \hat{x}(t), \beta(t)) = \min_{a \in A_s(t)} L(x(t), s(t), a), \quad (11)$$

где:

$\beta(t)$ — ресурсные ограничения;

A_s — множество допустимых действий в ситуации s .

Функция потерь должна объединять три ключевые составляющие:

$$L(a) = C_w(a) + C_i(a) + P_f(a) \cdot C_f, \quad (12)$$

где:

$C_w(a)$ — прямые затраты на выполнение работ по техническому обслуживанию и ремонту;

$C_i(a)$ — социально-экономические издержки из-за ограничения движения и возможного перепробега транспорта, увеличения времени пребывания в пути пассажиров;

$P_f(a)$ — вероятность отказа при выбранном действии;

C_f — стоимость последствий отказа/аварии (ущерб).

Прямые связи преобразуют физическое состояние реального объекта в управленческое решение: $L1 \rightarrow L2 \rightarrow L3 \rightarrow L4 \rightarrow L5 \rightarrow L6$. Обратные связи замыкают контур управления и задают адаптивность системы. Иными словами, система не только осуществляет решение, но и проверяет и корректирует при необходимости итоговый эффект.

Разработанная модель системы интеграции ТИМ-моделей в процессы технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений может быть формализована в виде ориентированного графа переходов (рис. 2), отражающего последовательное преобразование информации и замкнутый характер управления ТЭС сооружения.

Вершины графа соответствуют функциональным уровням системы эксплуатации:

- уровню физического объекта и контролируемых параметров;
- уровню диагностики;
- уровню информационного моделирования (ТИМ);
- уровню оценки и прогноза состояния;

- уровню формирования эксплуатационной ситуации;
- уровню принятия управленческих решений.

Рёбра графа представляют собой операторы преобразования информации:

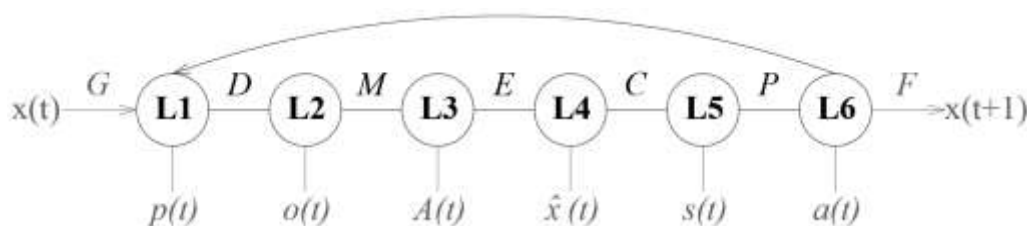


Рисунок 2. Совмещенный граф преобразования информации (разработано авторами)

Переход от уровня L1 к L2 соответствует преобразованию результатов измерений в диагностические показатели. Здесь осуществляется переход от физического состояния сооружения к формализованному описанию дефектов и повреждений.

Переход от L2 к L3 реализует интеграцию диагностической информации в ТИМ-модель. На этом этапе ТИМ выступает как структурированная база эксплуатационных данных, в которой каждый элемент моста связан с конкретными диагностическими параметрами и историей изменения этих параметров.

Переходы L3 → L4 → L5 отражают аналитическую часть системы — оценку текущего состояния, прогноз его изменения и формирование эксплуатационной ситуации.

Обратная связь L6 → L1 демонстрирует, что любые управляющие воздействия изменяют физическое состояние сооружения, что должно быть зафиксировано в системе и учтено при последующих циклах управления.

Рассмотрим числовой пример одного цикла работы системы. Значения параметров, порогов и стоимостных оценок приведены условно и предназначены исключительно для демонстрации работы алгоритма системы.

Уровень L1:

Пусть для сборной железобетонной балки e длиной 15,0 м измерено вертикальное перемещение (прогиб) $p_l = 34,0$ мм.

Нормативное предельное значение составляет: $p_l^{lim} = \frac{l_p}{400} = \frac{15\,000 - 300 \cdot 2}{400} = 36,0$ мм.

Уровень L2:

Нормируем параметр функцией пригодности: $\varphi_l(p_l) = \max\left(0, 1 - \frac{p_l}{p_l^{lim}}\right) = \left(1 - \frac{34,0}{36,0}\right) = 0,06$.

Поскольку рассматривается один контролирующий параметр для данного элемента, то $w = w_l = 1,0$ (в иных случаях $\sum_{i=1}^m w_i = 1$). Вычисляем индекс технического состояния элемента: $I_e = \sum_{i=1}^m w_i * \varphi_i * (p_i(t)) = w_l * \varphi_l = 1,0 * 0,06 = 0,06$.

Интерпретируя значение I_e получим, что балка близка к неработоспособному состоянию, поскольку $I_e \rightarrow 0$.

Уровень L3:

В ТИМ-модель добавляется атрибут элемента: $I_e(t) = 0,06$; $p_l = 34,0$; фото, материалы геодезической съемки. Создается атрибутивное состояние $A(t)$.

Уровень L4:

В качестве примера принимаем, что без управляющего воздействия индекс технического состояния элемента, согласно прогнозам, уменьшается на $\Delta I = 0,01$ за период $I_e(t + 1) = I_e(t) - 0,01 = 0,06 - 0,01 = 0,05$. Выполняется переход от фиксации фактических данных к прогнозно-аналитическому управлению.

Уровень L5:

Пусть условно заданы пороговые значения $\theta_1 = 0,5$, $\theta_2 = 0,4$, $\theta_3 = 0,1$. Очевидно, что $I_e(t) = 0,06 < \theta_3 = 0,1 \geq s(t) = s_3$ (критическое состояние).

Уровень L6:

Например, в рассматриваемой эксплуатационной ситуации возможны следующие управленческие решения:

a_1 — реорганизация дорожного движения для ограничения воздействия подвижной нагрузки на элемент (балку) и его замена;

a_2 — реорганизация дорожного движения для ограничения воздействия подвижной нагрузки на элемент (балку) и его усиление.

Задаем функцию потерь: $L(a) = C_w(a) + C_t(a) + P_f(a) \cdot C_f$.

Условно принимаем следующие оценки:

- стоимость последствий возможной аварии $C_f = 50$ млн у.е.;
- для управляющего воздействия a_1 : $C_w = 3,0$ млн у.е., $C_t = 0,8$ млн у.е., $P_f = 0,005$;
- для управляющего воздействия a_2 : $C_w = 1,2$ млн у.е., $C_t = 0,3$ млн у.е., $P_f = 0,02$.

Тогда: $L(a_1) = 3,0 + 0,8 + 0,005 \cdot 50 = 4,05$ млн у.е.; $L(a_2) = 1,2 + 0,3 + 0,02 \cdot 50 = 2,5$ млн у.е.

По критерию минимизации функции потерь $\min_{a \in A_{s(t)}} L(x(t), s(t), a) = a_2$.

Выбирается a_2 как экономически предпочтительное при заданных оценках и ограничениях.

Реализация обратной связи:

После выполнения усиления элемента измерения повторяются и индекс технического состояния пересчитывается. Например, он составил: $I_e(t + 1) = 0,8 > \theta_1 = 0,5 \Rightarrow s(t + 1) = s_0$.

При этом в ТИМ-модели фиксируется факт проведения работ, изменение параметров конструктивных элементов, влияние на индекс технического состояния и цикл управления замыкается.

Заключение

Таким образом, была разработана модель системы интеграции ТИМ-моделей в процессы технического обслуживания и ремонта мостовых сооружений, ориентированная на практическое применение и формализованное управление ТЭС. Ключевым результатом является переход от фрагментарного использования ТИМ как хранилища данных и инструмента визуализации к его применению в качестве информационного ядра системы управления, обеспечивающего замкнутый логический цикл переходов «исходное состояние — данные — оценка — решение — воздействие».

Предложенная модель позволяет:

- повысить обоснованность эксплуатационных решений;
- обеспечить прозрачность и воспроизводимость инженерных выводов;
- создать основу для перехода к цифровым двойникам мостовых сооружений [5; 6].

При этом в отечественных публикациях отдельно отмечаются организационные и методические проблемы внедрения цифровых двойников, включая вопросы организации данных, регламентов и интеграции с эксплуатационными процедурами и воздействиями [14; 15].

В то же время модель предъявляет повышенные требования к качеству исходных данных, методическому и методологическому сопровождению в контексте калибровки функционирования операторов, что определяет направления дальнейших исследований, связанных с автоматизацией сбора данных, учётом неопределённости и развитием интеллектуальных методов анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойков В. Н. ИнфраТИМ как инновационный базис поддержки жизненного цикла дорог / В. Н. Бойков, А. В. Скворцов // Дороги и мосты. — 2024. — № 52(2). — С. 77–92. — URL: <https://indorsoft.ru/upload/iblock/3e7/nmyt5j6niehm3m3tkb2ktuuv4zrtxdr0/Boykov-V.N.-Skvortsov-A.V.-InfraTIM.-Rosdornii.pdf>. — EDN: [NSDOQX](#). (дата обращения: 01.02.2026).
2. Самодурова Т. В. Планирование работ по содержанию мостовых сооружений на основе мониторинга технического состояния / Т. В. Самодурова, С. В. Кузнецова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2025. — № S4. — С. 62–69. — URL: <https://veststu.elpub.ru/jour/article/view/202/202>. — DOI: [10.52170/1815-9265_2025_76_62](#). — EDN: [JKRKVL](#). (дата обращения: 01.02.2026).
3. Мячин В. Н. Технология анализа результатов мониторинга при эксплуатации уникального мостового сооружения (на примере Русского моста) / В. Н. Мячин // Дороги и мосты. — 2023. — № 49(1). — С. 178–191. — URL: <https://rosdornii.ru/dim/49-vypusk/tehnologiya-analiza-rezultatov-monitoringa-pri-ekspluatatsii-mostovogo-perekhoda-na-ostrov-russkiy/>. (дата обращения: 03.02.2026).
4. Ефимов С. В. Применение технологии информационного моделирования при разработке проекта ремонта мостового сооружения / С. В. Ефимов, А. В. Паторняк, И. В. Чаплин // Вестник Инженерной школы ДВФУ. — 2024. — № 3(60). — С. 113–121. — DOI: [10.24866/2227-6858/2024-3/113-121](#). — EDN: [DPKWBE](#). (дата обращения: 06.02.2026).
5. Чаплин И. В. Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста / И. В. Чаплин, А. В. Патроняк, С. В. Ефимов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2025. — Т. 22, № 3. — С. 831–838. — URL: <https://izvestiapgups.editorum.ru/ru/nauka/article/104402/view>. — DOI: [10.20295/1815-588X-2025-3-831-838](#). — EDN: [WTQTHC](#). (дата обращения: 10.02.2026).
6. Бородай Д. И. Перспективы использования технологии информационного моделирования для эксплуатируемых автодорожных мостов / Д. И. Бородай, С. М. Семенов, В. И. Федотов, М. Е. Лучков // Вестник ДонНАСА. — 2021. — № 1(147). — URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2021/2021-1%28147%29/st_16_boroday_semenov_fedotov_luchkov.pdf. — EDN: [ACMLIV](#). (дата обращения: 21.02.2026).

7. Наролина Т. С. Система обслуживания мостов на основе BIM (BMS) для управления данными о дефектах / Т. С. Наролина, А. А. Черных // International Journal of Humanities and Natural Sciences. — 2023. — № 8-2(83). — С. 147–150. — URL: <https://intjournal.ru/wp-content/uploads/2023/09/Narolina.pdf>. — DOI: [10.24412/2500-1000-2023-8-2-147-150](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-8-2-147-150). — EDN: [RQPUXR](https://www.edn.net/RQPUXR). (дата обращения: 22.02.2026).
8. Новиков В. Н. Проектирование конуса обсыпного устоя мостового сооружения с использованием цифровой информационной модели / В. Н. Новиков // Дороги и мосты. — 2023. — № 50(2). — С. 160–170. — URL: <https://rosdornii.ru/dim/50-vypusk/realizatsiya-protsesta-modelirovaniya-konusa-obsypnogo-ustoya-mostovogo-sooruzheniya-v-sisteme-indor/>. (дата обращения: 01.03.2026).
9. Квашнин Н. М. Методики обработки экспериментальных данных мониторинга состояния мостовых конструкций / Н. М. Квашнин, И. С. Бондарь, М. Я. Квашнин // Мир транспорта. — 2021. — Т. 19, № 4(95). — С. 22–33. — URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/2152>. — DOI: [10.30932/1992-3252-2021-19-4-3](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-3). — EDN: [YZMEWV](https://www.edn.net/YZMEWV). (дата обращения: 06.03.2026).
10. Зуев Д. В. Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли / Д. В. Зуев // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2025. — № 4(44). — С. 33–46. — URL: <https://itt-pgups.ru/ru/storage/download/245508>. — DOI: [10.20295/2413-2527-2025-444-33-46](https://doi.org/10.20295/2413-2527-2025-444-33-46). — EDN: [BJMGDY](https://www.edn.net/BJMGDY). (дата обращения: 06.03.2026).
11. Бойкова А. В. Внедрение цифровых двойников в строительной отрасли: направления и проблемы / А. В. Бойкова, Ю. В. Витяхова // Journal of Modern Engineering and Applied Mathematics. — 2025. — № 8. — URL: <https://jomeam.ru/en/storage/download/237463>. — DOI: [10.26118/2782-4586.2025.62.63.075](https://doi.org/10.26118/2782-4586.2025.62.63.075). — EDN: [VIPCRD](https://www.edn.net/VIPCRD). (дата обращения: 20.03.2026).
12. Липанов И. Д. Цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры на основе данных лёгких БПЛА / И. Д. Липанов, А. Д. Хомоненко // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. — 2025. — Т. 17, № 3. — С. 50–56. — DOI: [10.36724/2409-5419-2025-17-3-50-56](https://doi.org/10.36724/2409-5419-2025-17-3-50-56). — EDN: [OKRQOE](https://www.edn.net/OKRQOE). (дата обращения: 21.03.2026).
13. Маринин А. Н. Формирование оптимальной стратегии эксплуатации мостовых сооружений по критерию долговечности в составе объектов обустройства нефтегазовых месторождений / А. Н. Маринин // Интернет-журнал "Экономика и социум" (ESJ). — 2024. — Т. 16, № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/48SAVN524.pdf>. — EDN: [LYVXFD](https://www.edn.net/LYVXFD). (дата обращения: 22.03.2026).
14. Еськов Д. В. О проблемах во внедрении технологии цифровых двойников ИССО на сети железных дорог / Д. В. Еськов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2025. — № S4. — URL: <https://www.vestnikstu.ru/jour/article/view/210>. — DOI: [10.52170/1815-9265_2025_76_110](https://doi.org/10.52170/1815-9265_2025_76_110). — EDN: [ZTLVSC](https://www.edn.net/ZTLVSC). (дата обращения: 22.03.2026).
15. Свинцов С. Е. Оценка применимости цифровых двойников разводных железнодорожных мостов / С. Е. Свинцов // Инновационные транспортные системы и технологии. — 2025. — Т. 11, № 4. — URL: <https://transsyst.ru/transj/article/view/687854>. — DOI: [10.17816/transsyst687854](https://doi.org/10.17816/transsyst687854). — EDN: [NCONWE](https://www.edn.net/NCONWE). (дата обращения: 25.03.2026).
16. Тимофеев Е. Н. Создание цифровой модели железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов / Е. Н. Тимофеев, А. А. Севостьянов, А. В. Сокольников // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1(68). — С. 73–82. — DOI: [10.52170/1815-19265](https://doi.org/10.52170/1815-19265). — EDN: [MHUGVS](https://www.edn.net/MHUGVS). (дата обращения: 27.03.2026).

17. Ефимов С. В. Анализ конструктивного исполнения автодорожных железобетонных мостов для создания каталогов цифровых информационных моделей их элементов / С. В. Ефимов, Е. С. Кокоева // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2025. — № 1. — URL: <https://www.vestnikstu.ru/jour/article/view/184>. — DOI: [10.52170/1815-9265](https://doi.org/10.52170/1815-9265). — EDN: [JAWUOS](https://www.edn.net/JAWUOS). (дата обращения: 30.03.2026).
18. Алексеев С. В. Влияние природных факторов на состояние дорог в различных регионах России / С. В. Алексеев, Д. Л. Симонов, А. С. Катикова // Инновационные транспортные системы и технологии. — 2022. — Т. 8, № 4. — С. 14–30. — URL: <https://transsyst.ru/transj/article/view/115044>. — DOI: [10.17816/transsyst20228414-30](https://doi.org/10.17816/transsyst20228414-30). — EDN: [IJPNCA](https://www.edn.net/IJPNCA). (дата обращения: 02.04.2026).
19. Яшнов А. Н. Диагностика и мониторинг несущих конструкций транспортных систем / А. Н. Яшнов, Л. А. Васильчук, П. Ю. Кузьменков, И. В. Чаплин // Инновационные транспортные системы и технологии. — 2021. — Т. 7, № 4. — С. 43–51. — URL: <https://transsyst.ru/transj/article/view/90761>. — DOI: [10.17816/transsyst20217443-51](https://doi.org/10.17816/transsyst20217443-51). — EDN: [MPKLFW](https://www.edn.net/MPKLFW). (дата обращения: 05.04.2026).
20. Кирсанов М. Н. Анализ зависимости частоты колебаний пространственной консольной фермы от числа панелей / М. Н. Кирсанов, О. В. Воробьёв // Вестник МГСУ. — 2021. — Т. 16, № 5. — С. 570–576. — DOI: [10.22227/1997-0935.2021.5.570-576](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.5.570-576). — EDN: [VXHOEY](https://www.edn.net/VXHOEY). (дата обращения: 05.04.2026).
21. Коргин А. В. Логарифмический декремент колебаний мостов из алюминиевых сплавов / А. В. Коргин // Вестник МГСУ. — 2023. — Т. 18, № 4. — С. 572–583. — DOI: [10.22227/1997-0935.2023.4.572-583](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.4.572-583). — EDN: [FLPWBS](https://www.edn.net/FLPWBS). (дата обращения: 10.04.2026).

Voronkov Oleg Nikolayevich

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: voronkov.kubstu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4178-4626>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1315614

Valiev Sherali Nazaralievich

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: vshn2014@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6326-2233>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=284723

Integration of information models into the system of maintenance and repair of bridge structures

Abstract. The article proposes a model of a system for integrating information modeling technologies into the processes of maintenance and repair of bridge structures at the operational stage. The model considers operation as a closed loop of information transformation: from controlled parameters and results of inspections and diagnostics to data structuring in an information model, assessment and forecasting the technical and operational condition, the formation of the operational situation and the choice of management actions according to the criterion of minimizing total losses. Integration levels have been introduced, including the object, controlled parameters, diagnostics, information model, assessment and forecasting, situation and solution, as well as transition operators between them, ensuring data traceability and reproducibility of solutions. A list of groups of controlled parameters is proposed, including geometric, defective, dynamic, transport and climatic characteristics, and an approach to the formation of an integral index of the state of elements based on normalization and weight convolution of indicators is shown. To illustrate the circuit's operability, a numerical example of a single control cycle is given. The presented model can be used as a methodological basis for constructing digital contours of operation and subsequent implementation of digital counterparts of bridge structures. The conditions of applicability of the model are noted: the regulation of the composition of measurements, the quality and frequency of observations, the methodological justification of the threshold values of situations and weight coefficients, as well as the organization of updating the attributive part of the information model after the work is completed. It is shown that the transition from defect fixation to condition management is achieved by formalizing feedback and unifying data presentation, which is especially important when operating a fleet of facilities and allocating limited resources.

Keywords: bridge structures; operation; information modeling technologies; maintenance; repair; condition index; situational management; digital twin