

Б. В. МАЛОЗЁМОВ¹, канд. тех. наук, доц.

Н. В. МАРТЮШЕВ², канд. тех. наук, доц.

С. А. ВНУКОВ¹

Н. Д. ЕРЕЩЕНКО¹

¹Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Россия)

²Томский политехнический университет (Томск, Россия)

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА И ПРИОРИТИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация. Предложена архитектура цифрового двойника электротранспортного объекта, объединяющая поток телеметрии, физико-ориентированную модель, апостериорное обновление параметров и сервисный контур принятия решений. Особое внимание уделено качеству данных, проверке теплового контура и формированию карты эксплуатационного риска. Показано, что цифровой двойник целесообразно использовать не как замену неразрушающего контроля, а как инструмент предварительного ранжирования узлов по вероятности дефекта и тяжести последствий.

Ключевые слова: цифровой двойник, электротранспорт, остаточный ресурс, телеметрия, качество данных, предиктивное обслуживание

Введение

Цифровой двойник электротранспорта представляет собой не статическую расчетную модель, а обновляемую информационно-математическую копию объекта, которая связывает измерения, скрытое техническое состояние и сервисное решение. Для парка электротранспорта это особенно важно, поскольку одинаковые по типу машины работают в разных маршрутах, температурных условиях и режимах заряда [1, 2]. В работе цифровой двойник рассматривается как надстройка над диагностикой и неразрушающим контролем. Он не должен отменять тепловизионный, виброакустический или электрический контроль [3]. Его задача – заранее указать, где вероятность дефекта и цена отказа выше, а значит, куда следует направить диагностический ресурс в первую очередь.

На рис. 1 представлена архитектура цифрового двойника, в которой поток измерений замыкается на модель состояния и сервисное решение. Из рисунка видно, что цифровой двойник не ограничивается расчетом RUL. Его ценность возникает в замкнутом контуре: измерения уточняют параметры модели, а уточненная модель изменяет приоритет технического обслуживания.

Архитектурные контуры. Структура цифрового двойника разделена на четыре контура: информационный, модельный, прогностический и сервисный. Такое разделение позволяет не смешивать задачи очистки данных, идентификации состояния, прогнозирования и выбора инженерного действия.

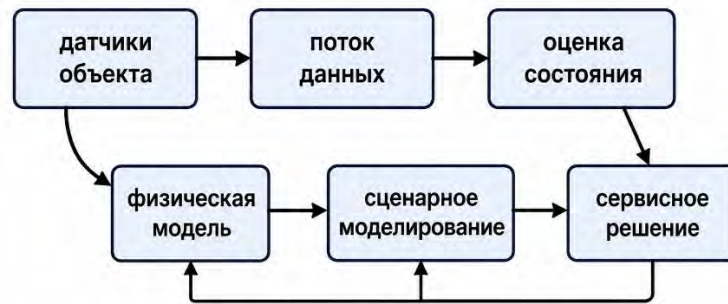


Рис. 1. Архитектура обновляемого цифрового двойника электротранспортного объекта

В Таблице 1 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 1. Контуры цифрового двойника и их функции

Контур	Функция	Входные данные	Результат
Информационный	сбор и синхронизация	телеметрия, журналы ТО, события НК	согласованные признаки
Модельный	описание состояния	параметры батареи, двигателя, охлаждения	вектор скрытого состояния
Прогностический	расчет RUL и риска	траектории состояния, сценарии нагрузки	интервал ресурса
Сервисный	выбор действия	риск, стоимость отказа, доступность ремонта	приоритет обслуживания

Данные приведенные в таблице показывают, что цифровой двойник является многоуровневой системой. Цель структуры – отделение прогноза ресурса от сервисного решения: одинаковый RUL может иметь разную практическую значимость для разных узлов.

Математическое ядро и обновление параметров

Скрытое состояние объекта в дискретные моменты времени задается вектором x_k . Для тяговой батареи он может включать остаточную емкость, внутреннее сопротивление, температурную инерцию и дисбаланс ячеек; для тягового двигателя – вибрационный уровень, температуру обмоток и диагностический показатель изоляции [4]

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, \theta_k) + w_k, \quad y_k = h(x_k) + v_k, \quad (1)$$

где x_k – скрытый вектор состояния; u_k – эксплуатационные воздействия; y_k – наблюдаемые параметры; θ_k – параметры деградации; w_k и v_k – шумы модели и

измерений. Смысл цифрового двойника состоит в том, что θ_k уточняется по мере накопления наблюдений:

$$p(\theta|Y_k) = \frac{p(Y_k|\theta)p(\theta)}{p(Y_k)}, \quad (2)$$

где $p(\theta|Y_k)$ – апостериорная плотность вероятности, $p(Y_k|\theta)$ – функция правдоподобия, $p(\theta)$ – априорная плотность вероятности, $p(Y_k)$ – нормирующая константа.

Качество данных учитывается отдельным индексом Q_k , так как пропуски, выбросы и рассинхронизация могут имитировать ухудшение технического состояния

$$Q_k = 1 - (\gamma_1 p_{\text{miss},k} + \gamma_2 p_{\text{out},k} + \gamma_3 p_{\text{sync},k}). \quad (3)$$

На рис. 2 приведен график изменения качества данных Q в течение эксплуатационного дня.

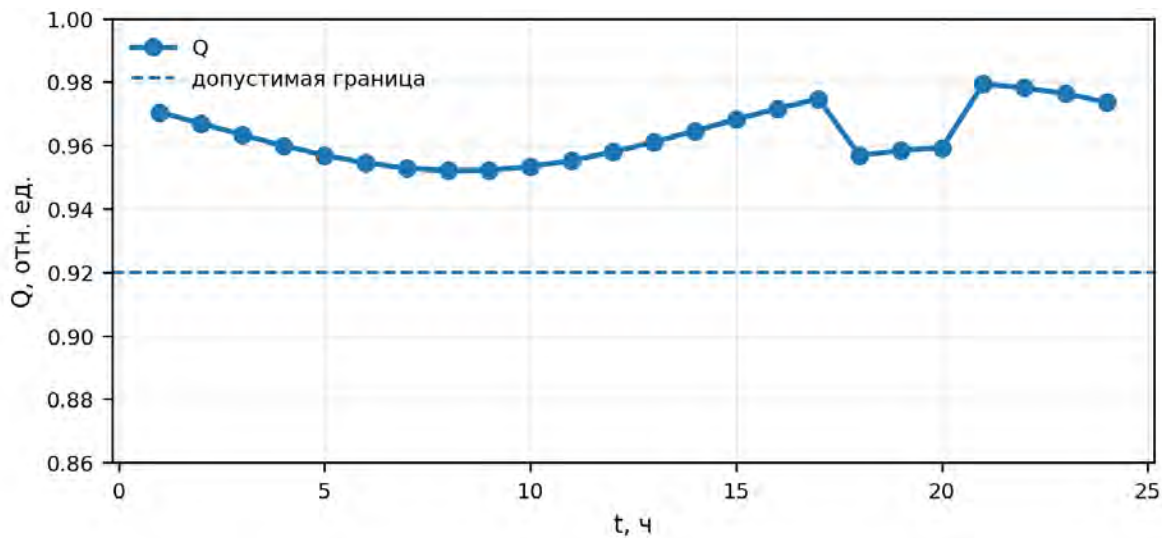


Рис. 2. Изменение индекса качества данных в течение смены

График показывает, что ухудшение качества данных имеет выраженную внутрисменную динамику. При этом модель должна отличать снижение достоверности наблюдений от реальной деградации узла.

Прогноз остаточного ресурса определяется как момент выхода прогнозной траектории за допустимую область состояний Ω_{safe}

$$RUL_k = \min\{\tau : x_{k+\tau} \notin \Omega_{safe}\}. \quad (4)$$

На рис. 3 показана поверхность RUL в координатах температуры и глубины разряда.

Поверхность демонстрирует нелинейное влияние теплового режима. Одинаковая глубина разряда имеет разный ресурсный смысл при 25 °С и при 55 °С, что делает учет температуры обязательным.

Проверка теплового контура и сходимость модели

Верификация цифрового двойника выполняется не только по итоговой ошибке прогноза. Необходимо отдельно контролировать воспроизведение тепловой динамики, поскольку перегрев является одним из ранних признаков ухудшения контакта, охлаждения или режима нагрузки [5].

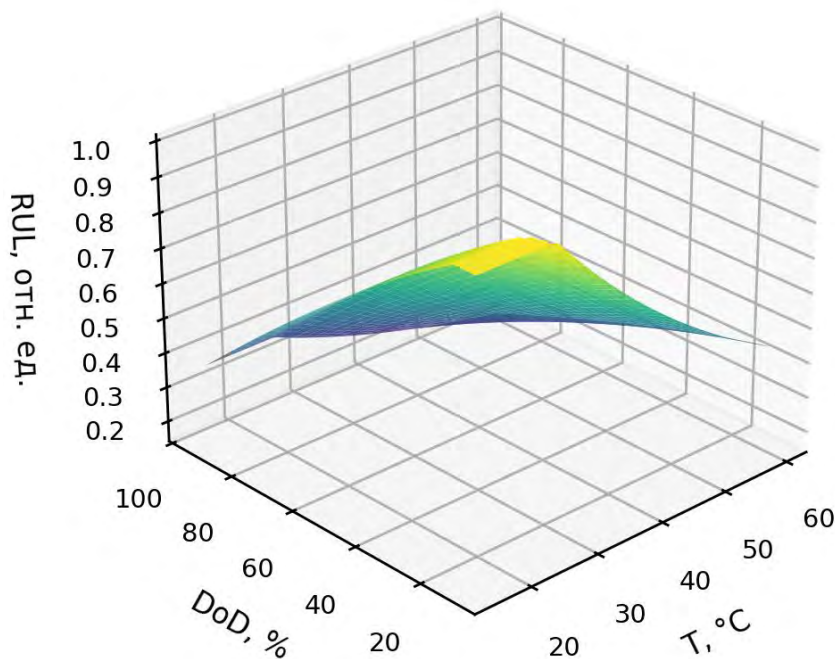


Рис. 3. Поверхность нормированного остаточного ресурса в цифровом двойнике

На рис. 4 добавлен экспериментальный график сопоставления измеренной и расчетной температуры при нагрузочном цикле.

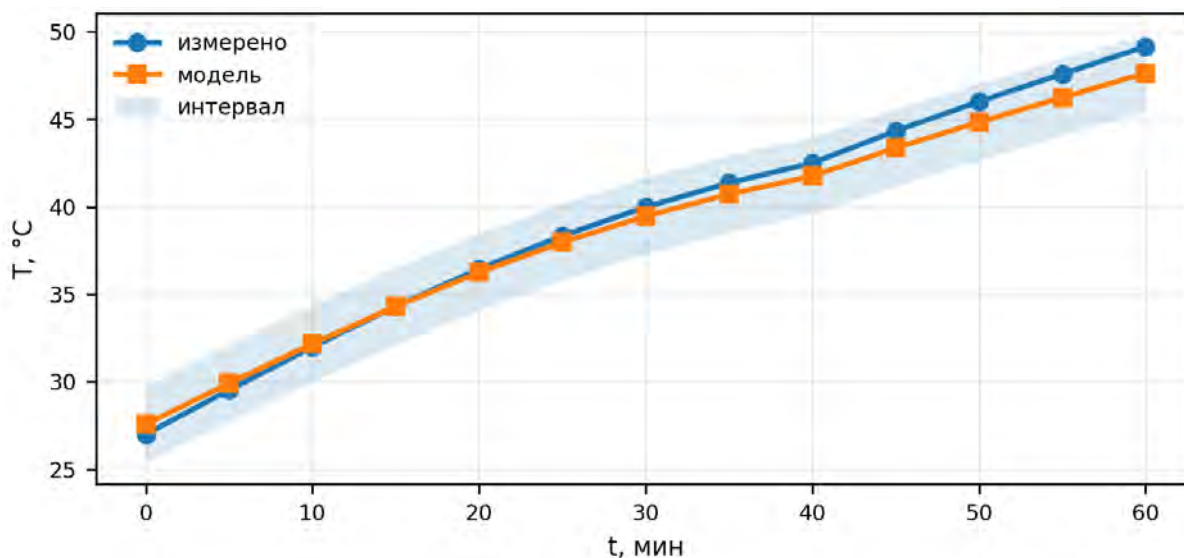


Рис. 4. Экспериментальная проверка теплового контура цифрового двойника

Из графика видно, что модель воспроизводит общий рост температуры и удерживает измерения внутри расчетного интервала. Основное назначение проверки – контроль не только среднего отклонения, но и способности модели уловить ускорение нагрева после 40-й минуты.

На этапе апостериорного обновления важна ширина интервала неопределенности. После нескольких циклов обновления снижается как ошибка, так и неопределенность параметров, что делает двойник более индивидуализированным для конкретной единицы транспорта. На рис. 5 показано изменение ошибки прогноза и ширины апостериорного интервала при последовательном обновлении параметров.

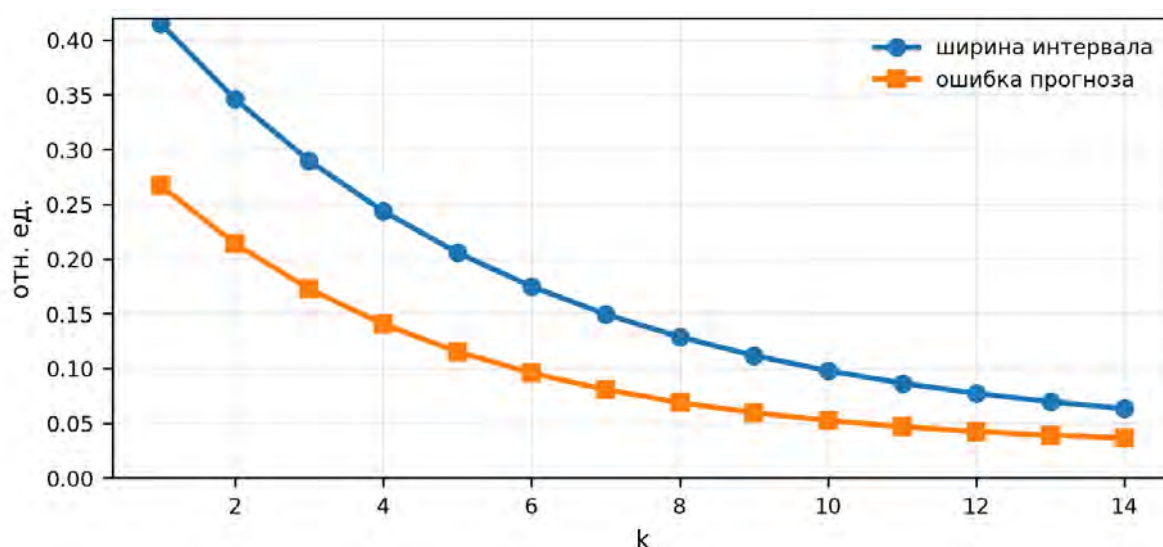


Рис. 5. Сходимость апостериорного обновления параметров цифрового двойника

Кривая сходимости показывает, что наибольший выигрыш достигается в первые циклы обновления. Это важно для практики: цифровой двойник становится полезным до накопления многолетней статистики отказов. В Табл. 2 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 2 – Сценарии эксплуатации и ожидаемая реакция цифрового двойника

Сценарий	Температура	Нагрузка	Качество данных	Реакция модели
Равномерный маршрут	25 – 35 °С	0,45 – 0,60	$Q > 0,95$	сужение интервала ресурса
Пиковая нагрузка	35 – 48 °С	0,70 – 0,90	$Q > 0,93$	рост эксплуатационного риска
Неполные данные	25 – 40 °С	0,50 – 0,75	$0,88 < Q < 0,92$	расширение интервала прогноза
Тепловое отклонение	> 48 °С	0,60 – 0,85	$Q > 0,94$	углубленный контроль

Из анализа данных, приведенных в таблице 2, видна принципиальная разница между неблагоприятным режимом и плохими данными. В первом случае система повышает риск, во втором – расширяет неопределенность и требует проверки качества измерений.

Сервисная карта риска

Сервисное решение формируется не только по величине RUL . Узел с умеренным ресурсным снижением, но высокой стоимостью отказа, может получить более высокий приоритет обслуживания, чем менее критичный узел с близким численным прогнозом

$$Risk_k = P(x_{k+\tau} \notin \Omega_{\text{safe}} | Y_k) \cdot \frac{C_f}{C_{\text{max}}}. \quad (5)$$

На рис. 6 представлена карта риска в координатах относительной нагрузки и температуры.

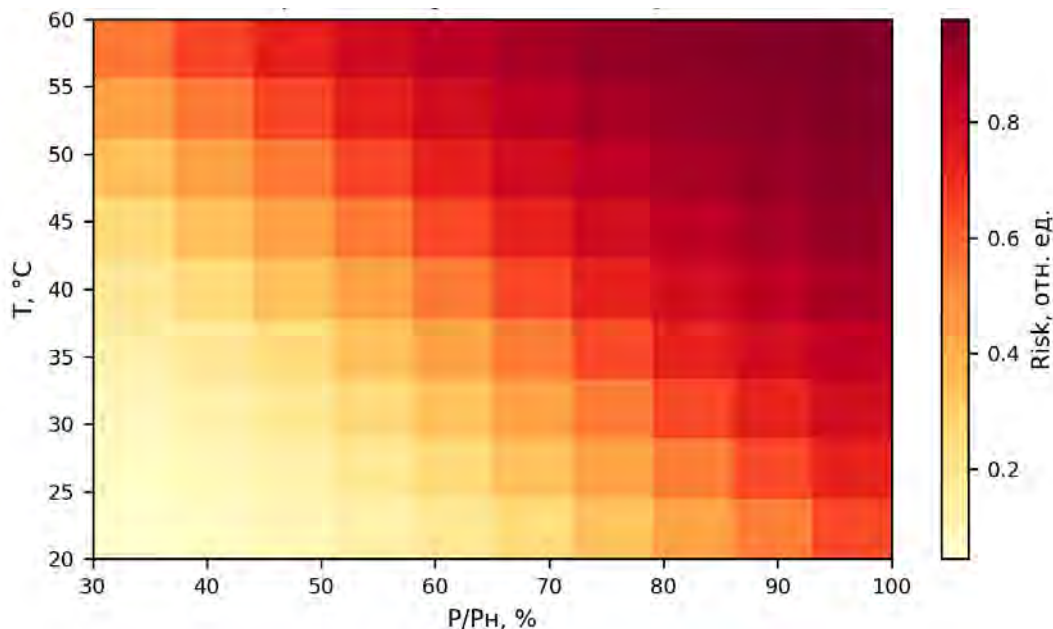


Рис. 6. Карта эксплуатационного риска для сервисной приоритизации

Карта переводит расчет цифрового двойника в область инженерного решения. Ее назначение – визуальное выделение сочетаний температуры и нагрузки, при которых плановый контроль должен быть заменен приоритетным обслуживанием.

Заключение

Предложенная структура цифрового двойника обеспечивает связку между телеметрией, физико-ориентированной моделью, статистическим обновлением и сервисным решением. В отличие от статических диагностических правил

цифровой двойник уточняет параметры под конкретный объект и формирует ресурсный прогноз с учетом качества данных.

Наиболее значимый прикладной результат состоит в предварительном ранжировании объектов неразрушающего контроля. Цифровой двойник не заменяет контроль, а повышает его адресность: сначала проверяются те узлы, где расчетный риск и тяжесть последствий максимальны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01565, <https://rscf.ru/project/25-29-01565>.

Список литературы

1. Martyushev N.V., Malozyomov B.V. et al. Reliability of Urban Electric Transport Running Autonomously through Diagnostic Parameters. WEVJ. 2023;14:334. DOI: 10.3390/wevj14120334.
2. Martyushev N.V., Malozyomov B.V. et al. Review Models and Methods for Determining and Predicting Reliability of Technical Systems and Transport. Mathematics. 2023;11:3317. DOI: 10.3390/math11153317.
3. Martyushev N.V., Malozyomov B.V. et al. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. Mathematics. 2023;11:536. DOI: 10.3390/math11030536.
4. Malozyomov B.V., Martyushev N.V. et al. Modelling of Reliability Indicators of a Mining Plant. Mathematics. 2024;12:2842. DOI: 10.3390/math12182842.
5. Pryalukhin A.F., Malozyomov B.V. et al. Energy Efficiency of Electric Dump Truck Use Depending on Operating Cycle. WEVJ. 2025;16:217. DOI: 10.3390/wevj16040217.

Контакты:

mbv5@mail.ru (Малозёмов Борис Витальевич)
nikita@ereschenko.ru (Мартюшев Никита Владимирович)
abakan.1998@mail.ru (Внуков Сергей Александрович)
nikita@ereschenko.ru (Ерещенко Никита Дмитриевич)