

УДК 625.1:620.1

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В СРЕДЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Пятков Д.А.¹, аспирант, I курс

¹Федеральный исследовательский центр

«Красноярский научный центр

Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния физико-механических и эксплуатационных свойств материалов, применяемых при изготовлении элементов стационарных систем сбора данных, на достоверность диагностической информации, используемой для формирования и актуализации цифрового двойника железнодорожного пути. Актуальность работы обусловлена тем, что погрешности, вносимые деградацией материалов корпусов, креплений, защитных покрытий и сенсорных узлов, могут приводить к искажению данных мониторинга, снижению точности прогнозных моделей и, как следствие, к ошибочным управленческим решениям. Цель исследования – установление корреляционных связей между изменением свойств материалов в процессе эксплуатации и метрологическими характеристиками сенсорных систем, а также разработка требований к материалам, обеспечивающим сохранение достоверности диагностики на протяжении всего жизненного цикла стационарного сегмента цифрового двойника. В работе проведен анализ деградационных процессов, характерных для различных классов материалов в условиях работы железнодорожного пути (полимеры, металлы, композиты), рассмотрены механизмы влияния температурных колебаний, вибрационных нагрузок, химически агрессивных сред на стабильность крепления и защитные свойства корпусов, предложены методики оценки и прогнозирования изменения метрологических характеристик сенсорных узлов. Особое внимание уделено вопросам выбора материалов для критических элементов стационарных систем, развертываемых на участках с экстремальными природно-климатическими условиями (Восточный полигон). Результаты исследования формируют научно обоснованную базу для проектирования надежных и долговечных аппаратных компонентов стационарного сегмента цифрового двойника железнодорожного пути.

Ключевые слова: цифровой двойник, железнодорожный путь, стационарная система мониторинга, достоверность диагностики, материалы сенсорных узлов, деградация материалов, климатическая стойкость, Восточный полигон.

Особую значимость проблема обеспечения достоверности диагностической информации приобретает для стационарных систем сбора данных, развертываемых на критических участках пути с повышенной интенсивностью деградиационных процессов. В отличие от мобильных диагностических средств, стационарные сенсорные сети функционируют непрерывно в течение длительного времени в условиях агрессивного воздействия комплекса эксплуатационных факторов: механических нагрузок, вибрации, перепадов температур, влажности, химически активных сред, биологических поражений.

Элементы стационарных систем: корпуса датчиков и устройства в целом, крепежные устройства, защитные покрытия, кабельные линии, элементы автономного энергоснабжения – подвергаются деградации, что неизбежно сказывается на их функциональных характеристиках и, в конечном счете, на достоверности передаваемой информации. Изменение свойств материалов может приводить к нарушению герметичности, смещению датчиков относительно контролируемых точек, изменению резонансных частот, дрейфу чувствительности, потерям в каналах связи.

Несмотря на очевидную значимость данной проблемы, в научной литературе преобладают исследования, посвященные алгоритмам обработки данных и прогнозным моделям, тогда как вопросам влияния материалов аппаратной части на достоверность диагностики уделяется недостаточно внимания.

Целью настоящего исследования является установление закономерностей влияния деградации материалов элементов стационарных систем сбора данных на достоверность диагностической информации и разработка научно-обоснованных требований к материалам, обеспечивающим сохранение метрологических характеристик в течение всего жизненного цикла системы.

Стационарная система сбора данных для цифрового двойника железнодорожного пути включает следующие функциональные элементы:

1. Сенсорные узлы – измерительные модули, содержащие датчики физических величин (акселерометры, тензодатчики, датчики температуры, влажности, положения и др.);
2. Корпуса – защитные оболочки, обеспечивающие сохранность электронных компонентов;
3. Крепежные элементы – устройства фиксации сенсорных узлов на элементах пути;
4. Кабельные линии и соединители – для проводных систем передачи данных и энергоснабжения;
5. Элементы автономного энергоснабжения – пьезогенераторы, солнечные панели, аккумуляторные батареи;
6. Антенные модули – для беспроводной передачи данных.

Каждый из перечисленных элементов вносит свой вклад в формирование общей достоверности диагностической информации.

Анализ условий эксплуатации стационарных систем на железнодорожном пути позволяет выделить следующие группы воздействующих факторов:

1. Климатические:

- диапазон температур от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$ (на Восточном полигоне);
- циклическое замораживание-оттаивание;
- атмосферные осадки, высокая влажность;
- солнечная радиация (УФ-облучение);
- ветровые нагрузки с абразивными частицами.

2. Механические:

- вибрации широкополосного спектра;
- ударные воздействия от балластного щебня при выполнении работ по техническому обслуживанию пути;
- статические нагрузки (снег, лед).

3. Химические:

- нефтепродукты (смазки, топливо);
- продукты коррозии.

4. Электромагнитные:

- поля тягового тока;
- помехи от контактной сети;
- разряды статического электричества.

Корпуса сенсорных узлов выполняют защитную функцию, обеспечивая сохранность электронных компонентов при воздействии внешней среды. Деградация материала корпуса приводит к следующим последствиям, влияющим на достоверность диагностики:

— Нарушение герметичности. Полимерные материалы (поликарбонат, АБС-пластик, полиамид) подвержены старению под действием УФ-излучения и термоциклирования, что проявляется в снижении ударной вязкости, образовании микротрещин и потере герметичности стыковых соединений. Проникновение влаги внутрь корпуса вызывает коррозию контактов, изменение сопротивления изоляции, короткие замыкания [1].

— Изменение теплового режима. Теплопроводность материала корпуса определяет температурный режим работы электронных компонентов. Накопление загрязнений, изменение цвета (выцветание под УФ) влияют на альбедо и, следовательно, на нагрев корпуса солнечным излучением. Перегрев датчиков может вызывать дрейф нуля, изменение чувствительности, сбои в работе электроники [2].

— Экранирование и диэлектрические свойства. Для антенных модулей критически важна радиопрозрачность материала корпуса. Изменение диэлектрической проницаемости материала вследствие старения, намокания, загрязнения приводит к рассогласованию антенных устройств, снижению дальности связи и потерям данных.

Точность измерения многих параметров (деформации, вибрации, положения) критически зависит от жесткости и стабильности крепления датчика к объекту контроля. Деградация материалов креплений проявляется следующим образом:

— Релаксация напряжений в полимерных креплениях. Полимерные материалы под нагрузкой подвержены ползучести, что приводит к ослаблению затяжки, изменению жесткости соединения и, как следствие, к искажению передаваемого на датчик сигнала [3]. Особенно критично это для креплений, работающих при циклических нагрузках и переменных температурах.

— Коррозия металлических креплений. Продукты коррозии увеличивают трение в подвижных соединениях, изменяют жесткость, могут приводить к заклиниванию. Образование оксидных пленок на контактных поверхностях ухудшает электропроводность в цепях заземления и экранирования.

— Деградация клеевых соединений. Применение клеевых лент и компаундов для крепления датчиков требует учета их стойкости к воздействию температуры, влаги, УФ. Расслоение клеевого соединения приводит к частичной или полной потере контакта датчика с объектом, что делает измерения недостоверными.

Для защиты электронных компонентов от влаги, пыли и химически активных сред применяются конформные покрытия (лаки, компаунды). Деградация защитных свойств покрытий проявляется как:

- Образование микротрещин при термоциклировании;
- Отслоение от подложки из-за различия коэффициентов термического расширения;
- Потеря диэлектрических свойств при намокании;
- Электрохимическая миграция под покрытием при наличии влаги и потенциала.

Для количественной оценки влияния деградации материалов на достоверность диагностической информации предлагается использовать следующую систему показателей:

1. Метрологическая надежность – вероятность сохранения нормированных метрологических характеристик в течение заданного времени
2. Коэффициент сохранения эффективности – отношение фактической точности измерения к паспортной после определенного срока эксплуатации
3. Вероятность потери данных – обусловленная отказами элементов системы
4. Коэффициент готовности – доля времени, в течение которого система сохраняет работоспособность
5. Показатель достоверности – вероятность того, что измеренное значение отличается от истинного не более чем на допустимую погрешность

3.2. Модели деградации материалов

Для прогнозирования изменения свойств материалов [4] во времени могут применяться следующие подходы:

— Физико-статистические модели основаны на уравнениях химической кинетики и описывают изменение ключевого параметра материала во времени.

— Модели накопления усталостных повреждений для металлов и композитов базируются на линейной гипотезе суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера или ее нелинейных модификациях [5];

— Марковские модели позволяют описывать процесс деградации как последовательность переходов между дискретными состояниями и особенно эффективны для систем с резервированием [6].

Для получения исходных данных для моделей деградации необходимы ускоренные климатические и механические испытания материалов в соответствии с требованиями стандартов:

— ГОСТ 30630.2.5-2013 – испытания на воздействие соляного тумана;

— ГОСТ 14254-2015 – оценка степени защиты (IP-коды);

— ГОСТ Р ИСО 16750-4 – испытания на климатические нагрузки;

— ГОСТ Р ИСО 16750-3 – испытания на механические нагрузки;

— ISO 9227 — коррозионные испытания в соляном тумане;

— ГОСТ 4647-2015 – определение ударной вязкости по Шарпи;

— ISO 4892 – испытания на светостойкость.

На основе проведенного анализа могут быть сформулированы следующие требования к материалам элементов стационарных систем сбора данных для железнодорожного пути:

Материалы корпусов

— Ударопрочность: ударная вязкость по Шарпи не менее 50 кДж/м² при -40°C;

— Морозостойкость: сохранение работоспособности при температурах до -60°C;

— УФ-стойкость: рейтинг не менее 5-7 баллов по шкале «синяя шкала» (ISO 4892);

— Водопоглощение: не более 0,2% за 24 ч;

— Класс защиты корпуса: IP68/IP69K.

Рекомендуемые материалы: поликарбонат (PC) со стабилизирующими добавками, полиамид 6, армированный стекловолокном (PA6-GF30), специальные морозостойкие компаунды.

Материалы креплений

— Коррозионная стойкость металлических элементов: стойкость в соляном тумане не менее 500 ч (ASTM B117) без признаков коррозии;

— Стойкость к ползучести полимерных креплений: модуль упругости не менее 3000 МПа при +60°C;

— Клеевые соединения: диапазон рабочих температур от -60°C до +80°C, адгезия к стали не менее 5 Мпа.

Рекомендуемые материалы: нержавеющие стали AISI 304/316, титановые сплавы, армированные полиэфирэфиркетоны (ПЕЕК), акриловые вспененные ленты 3M VHB.

- Диапазон рабочих температур: от -60°C до $+125^{\circ}\text{C}$;
- Диэлектрическая прочность: не менее 15 кВ/мм;
- Стойкость к термоциклированию: не менее 1000 циклов без образования трещин.

Рекомендуемые материалы: силиконовые конформные покрытия (SR), полиуретановые покрытия (UR) для умеренного климата.

Ранее известные материалы, которые успешно применяются в настоящее время на сети железных дорог, могут быть использованы для оптимизации как технических, так и экономических параметров производства аппаратной платформы цифрового двойника железнодорожного пути. Применение верифицированных в ходе многолетней эксплуатации материалов, традиционно используемых в путевом хозяйстве, открывает возможность для снижения ресурсоемкости и повышения экономической эффективности при создании технической инфраструктуры цифрового двойника.

Оптимальный выбор материала должен основываться на минимизации совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO) за весь жизненный цикл системы:

$$TCO = A + B + C + D$$

, где A – начальные затраты на материалы и изготовление, B – эксплуатационные затраты, C – затраты на обслуживание, D – потери от отказов (включая потерю достоверности данных).

Применение более дорогих, но более долговечных материалов может оказаться экономически оправданным, если это позволяет существенно снизить затраты на обслуживание и потери от отказов в течение жизненного цикла.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Свойства материалов элементов стационарных систем сбора данных оказывают определяющее влияние на достоверность диагностической информации, используемой для формирования и актуализации цифрового двойника железнодорожного пути [7-9]. Деградация материалов в процессе эксплуатации приводит к искажению измеряемых параметров, потерям данных и снижению точности прогнозных моделей.

2. Установлены основные механизмы влияния деградации материалов различных классов (полимеры, металлы, композиты) на функциональные характеристики сенсорных узлов: нарушение герметичности, изменение жесткости креплений, деградация защитных покрытий, снижение эффективности элементов энергоснабжения.

3. Предложена система показателей для количественной оценки влияния деградации материалов на достоверность диагностики и методология прогнозирования изменения этих показателей с использованием физико-статистических моделей и данных ускоренных испытаний.

4. Сформулированы научно обоснованные требования к материалам для различных элементов стационарных систем, дифференцированные по условиям эксплуатации, включая экстремальные условия Восточного полигона и зон вечной мерзлоты.

5. Обоснован экономический подход к выбору материалов на основе минимизации совокупной стоимости владения, учитывающий не только начальные затраты, но и эксплуатационные расходы, а также потери от снижения достоверности диагностики.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на создание специализированной базы данных по деградационным характеристикам материалов в условиях железнодорожной инфраструктуры, разработку методов неразрушающего контроля состояния материалов в процессе эксплуатации, а также на создание интеллектуальных материалов с функциями самодиагностики собственного состояния.

Список литературы

1. Павлов М. Р., Николаев Е. В., Андреева Н. П., Барботько С. Л. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. №7 (43). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-metodike-otsenki-stoykosti-polimernyh-materialov-k-vozdeystviyu-solnechnogo-izlucheniya-obzor> (дата обращения: 15.02.2026).

2. Семенцов С. Г., Гриднев В. Н., Сергеева Н. А. Исследование влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры тепловизионными методами // НиКа. 2016. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-temperaturnyh-rezhimov-na-nadezhnost-elektronnoy-apparatury-teplovizionnymi-metodami> (дата обращения: 15.02.2026).

3. Победря Борис Ефимович Об адекватности нелинейной теории вязкоупругости // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2012. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-adekvatnosti-nelineynoy-teorii-vyazkouprugosti> (дата обращения: 15.02.2026).

4. Алоев В. З., Жирикова З. М., Тарчокова М. А. ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2020. №1 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluempiricheskiy-metod-prognozirovaniya-ekspluatatsionnyh-svoystv-polimernyh-materialov> (дата обращения: 15.02.2026).

5. Стрижиус Виталий Ефимович Механизмы накопления усталостного повреждения при сложном программном нагружении слоистых композитов: существующие гипотезы // Глобальная энергия. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizmy-nakopleniya-ustalostnogo-povrezhdeniya-pri-slozhnom-programmnom-nagruzhenii-sloistyh-kompozitov-suschestvuyuschie> (дата обращения: 15.02.2026).

6. Пюкке Г. А. К вопросу об использовании марковской модели деградации при диагностировании технических систем // Вест. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2017. №3 (19). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-ispolzovanii-markovskoy-modeli-degradatsii-pri-diagnostirovanii-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 15.02.2026).

7. F. Tao, H. Zhang, A. Liu and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, April 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186. keywords: {Data models;Industries;Computational modeling;Smart manufacturing;Patents;History;Data fusion;digital twin (DT);industry application;modeling}

8. Шевченко Д.В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте. Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). 2021;80(2):91-99. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>

9. Пятков, Д. А. Цифровой двойник железнодорожного пути: актуальность, проблемы внедрения и перспективы развития / Д. А. Пятков // Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий (НТО-VI-2025) : сборник научных статей по материалам VI Всероссийской (национальной) научной конференции, Красноярск, 06–07 ноября 2025 года. – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2025. – С. 118-127. – EDN EUJUXC.