

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)

МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПО ТЕПЛОВЫМ, ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИЗНАКАМ

Аннотация. Представлен протокол мультимодального неразрушающего контроля элементов электротранспорта, основанный на совместном использовании тепловых, виброакустических, электромагнитных и геометрических признаков. Рассмотрены контактные зоны токоприемников, кабельные соединения, элементы тягового привода и изоляционные узлы. Предложен интегральный индекс дефектного риска, позволяющий объединить признаки разной физической природы и сформировать решение о повторном контроле, ремонте или продолжении эксплуатации.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электротранспорт, токоприемник, тепловизионный контроль, виброакустика, дефектный риск

Неразрушающий контроль электротранспорта имеет ряд особенностей. Контролируемые элементы одновременно испытывают электрическую нагрузку, механические вибрации, температурные перепады и воздействие окружающей среды [1]. Поэтому один метод контроля, как правило, фиксирует только часть дефектной картины.

В качестве объектов контроля рассматриваются токоприемные узлы, контактные соединения, кабельные наконечники, элементы тягового электропривода и зоны локального нагрева в силовых цепях. Для этих объектов характерны дефекты, которые сначала проявляются как малые изменения тепловой или виброакустической сигнатуры, а затем переходят в быстрый отказ [2,3].

В табл. 1 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков. Представленные данные показывают, что каждому объекту соответствует не один, а несколько физических каналов контроля. Это повышает устойчивость диагностики, поскольку дефект должен подтверждаться согласованными признаками.

Протокол измерений

Предлагаемый протокол строится как последовательность независимых каналов контроля с последующим объединением результатов. Сначала выполняется тепловая съемка под нагрузкой, затем регистрируется

вибраакустический отклик, после чего проводится электромагнитная или электрическая проверка зоны риска. Геометрический или визуальный контроль используется как подтверждающий этап.

Табл. 1 – Объекты и методы мультимодального контроля

Объект контроля	Основной дефект	Метод НК	Диагностический признак
Токоприемный узел	износ контактной поверхности	тепловизионный, виброакустический	ΔT , спектральная амплитуда
Кабельное соединение	ослабление контакта	тепловизионный, электрический	локальный перегрев, рост потерь
Тяговый двигатель	подшипниковый или щеточный дефект	виброакустический	полосовые признаки спектра
Изоляционный узел	увлажнение, загрязнение, старение	электромагнитный, электрический	изменение поля, ток утечки

На рисунке 1 представлена последовательность контроля от теплового сканирования до объединения дефектного риска.

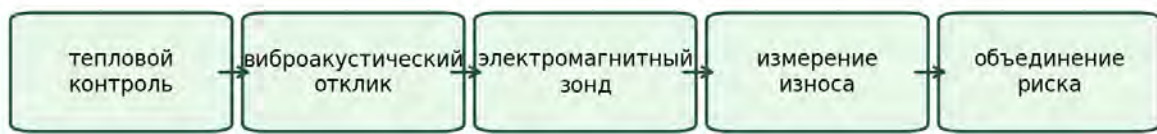


Рис. 1. Последовательность мультимодального неразрушающего контроля элементов электротранспорта

Из рисунка видно, что итоговое решение формируется не после первого превышения порога, а после объединения независимых физических признаков. Это снижает вероятность ложного брака и пропуска дефекта.

Для каждого канала вводится нормированный частный признак K_j . Он принимает малые значения при нормальном состоянии и растет при усилении дефектного проявления

$$K_j = \frac{s_j - s_{j,0}}{s_{j,\text{lim}} - s_{j,0}}, \quad 0 \leq K_j \leq 1. \quad (1)$$

где s_j – измеренный диагностический параметр; $s_{j,0}$ – уровень исправного состояния; $s_{j,\text{lim}}$ – предельное значение.

Интегральный индекс дефектного риска определяется как взвешенная сумма частных признаков

$$K_d = \sum \mu_j K_j + \mu_r K_{\text{rep}}, \quad \sum \mu_j + \mu_r = 1. \quad (2)$$

где μ_j – веса диагностических каналов; K_{rep} – показатель повторяемости дефектного признака при повторном измерении.

Включение повторяемости важно, поскольку одиночная тепловая или вибрационная аномалия может быть вызвана режимом нагрузки, положением датчика или внешней помехой.

Экспериментальные признаки дефектов

Тепловой канал наиболее чувствителен к контактным потерям. Для токоприемного узла диагностически важна не только максимальная температура, но и форма температурного профиля вдоль контактной зоны [4].

На рисунке 2 показан температурный профиль вдоль контактной зоны с локальной аномалией.

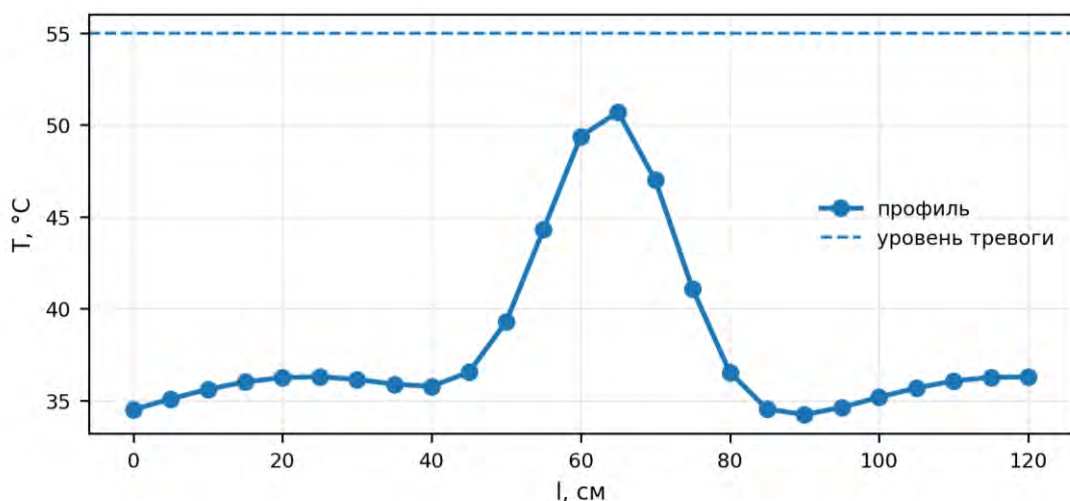


Рис. 2. Тепловая аномалия вдоль контактной зоны токоприемного узла

Главное в графике – локальность перегрева. Средняя температура узла может оставаться допустимой, но локальный максимум уже указывает на контактный дефект или неравномерный износ поверхности.

Виброакустический канал дополняет тепловой контроль, поскольку отражает механическую неравномерность контакта, износ и ударные компоненты. На рисунке 3 приведен дополнительный экспериментальный спектральный график для исправного и изношенного контактов.

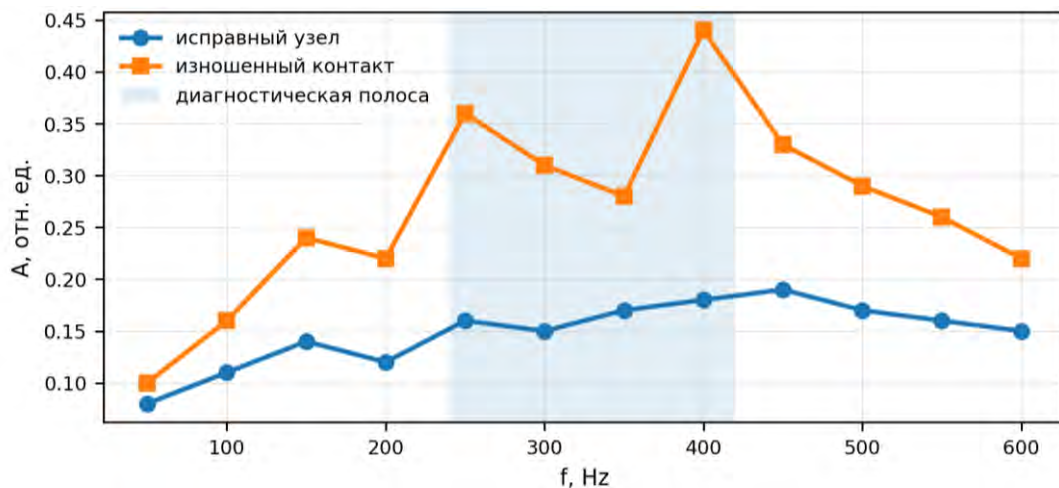


Рис. 3. Экспериментальный виброакустический спектр токоприемного узла

Основой спектра является появление диагностической полосы 240 – 420 Hz, где амплитуда изношенного контакта существенно выше нормы. Такой признак удобен для автоматизированного контроля, так как он менее зависит от абсолютного уровня сигнала. Для объединенной интерпретации удобно использовать пространство признаков. На рисунке 4 показано разделение нормального и дефектно-опасного состояний по двум нормированным признакам: тепловому K_T и вибрационному K_V и приведена двумерная диагностическая диаграмма с границей решения.

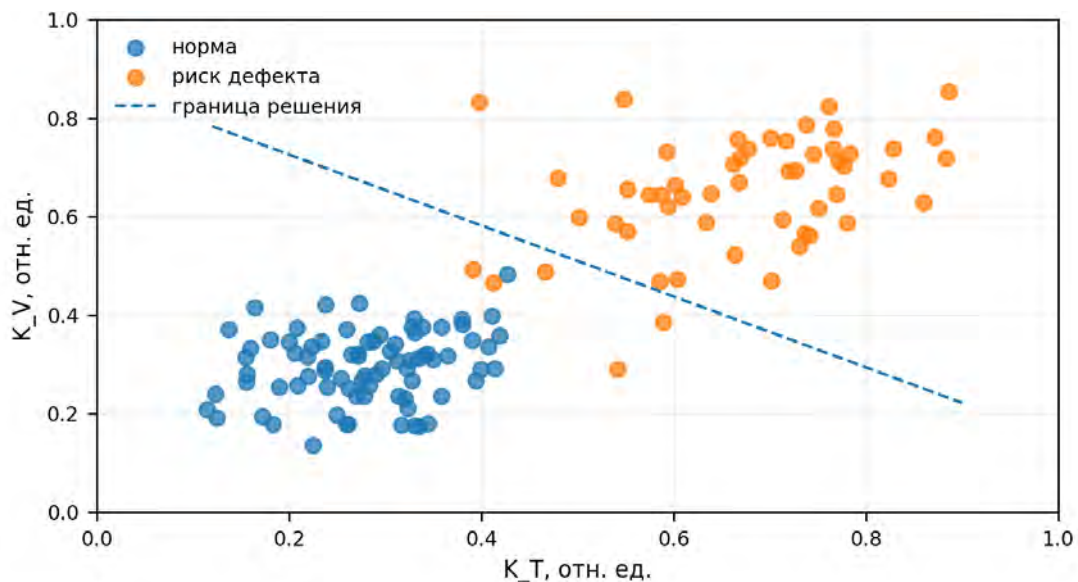


Рис. 4 – Разделение состояний в пространстве теплового и вибрационного признаков

Диаграмма показывает, что надежное решение возникает не из одного признака, а из их сочетания. Область риска формируется там, где одновременно растут тепловой и вибрационный отклики. В таблице 2 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 2. Правила интерпретации интегрального индекса дефектного риска

Диапазон K_d	Состояние	Решение	Комментарий
0,00–0,35	допустимое	эксплуатация без ограничения	повтор по регламенту
0,35–0,55	пограничное	повторный контроль	проверить режим нагрузки
0,55–0,75	дефектно-опасное	ремонт при ближайшем окне	подтвердить вторым каналом
0,75–1,00	критическое	вывод из эксплуатации	локализовать дефектный узел

Правила в таблице 2 специально разделяют пограничную и дефектно-опасную зоны. Это важно для электротранспорта: часть аномалий связана с режимом движения и должна подтверждаться повторяемостью.

Объединение каналов и принятие решения

Многоканальная сигнатура позволяет оценить, какой физический механизм доминирует в наблюдаемом отклонении. Если тепловой признак высок, а вибрационный и электромагнитный малы, вероятен контактный перегрев без развитого механического дефекта [5]. Если одновременно растут вибрационный и тепловой признаки, вероятность износа контактной пары существенно выше. На рисунке 5 показано сопоставление нормального состояния и дефектно-опасной сигнатуры по пяти признакам.

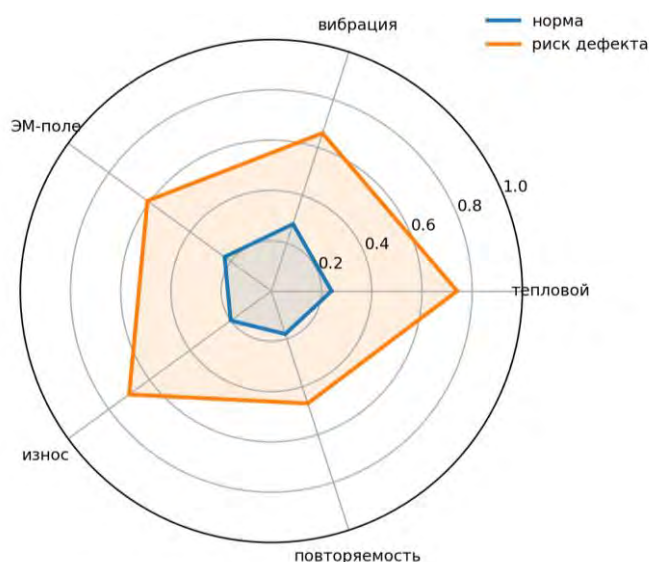


Рис. 5 – Многоканальная дефектная сигнатура контролируемого узла

Радарная диаграмма удобна для инженерной диагностики, потому что показывает не только величину риска, но и профиль его происхождения. Это позволяет выбрать метод уточняющего контроля. Статистическое распределение K_d используется для оценки доли объектов в разных состояниях и для настройки порогов контроля. На рис. 6 приведено распределение интегрального индекса K_d для нормальных и дефектно-опасных наблюдений.

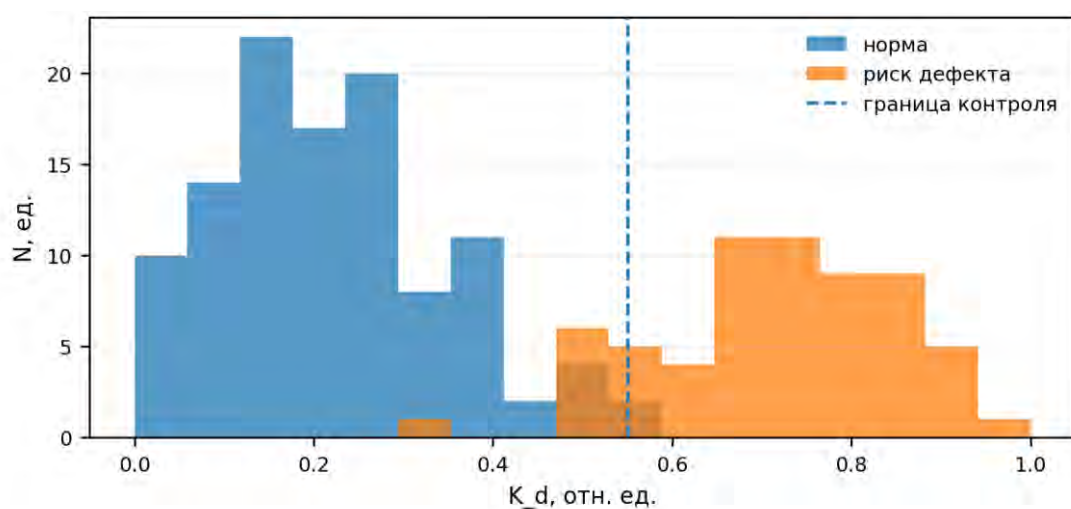


Рис. 6 – Распределение интегрального индекса дефектного риска.

Гистограмма показывает частичное перекрытие классов, что типично для реального НК. Главное здесь в том, что решение должно учитывать не только порог K_d , но и повторяемость признака, режим нагрузки и подтверждение другим каналом.

Выводы

Предложен протокол мультимодального неразрушающего контроля элементов электротранспорта, объединяющий тепловые, виброакустические, электромагнитные и геометрические признаки. Показано, что локальная тепловая аномалия, спектральный виброакустический рост и повторяемость признака должны рассматриваться совместно.

Практическая значимость подхода состоит в снижении вероятности ложных решений. Мультимодальная схема позволяет не только обнаружить отклонение, но и определить его физическую природу, что повышает точность выбора ремонтного действия.

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

Список литературы

- 1 Filina O. A., Martyushev N. V., Malozyomov B. V. et al. Diagnostics in the Brush-Commutator Assembly of a DC Motor. *Energies*. 2024;17:17. DOI: 10.3390/en17010017.
- 2 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.
- 3 Martyushev N. V., Malozyomov B. V. et al. Review Models and Methods for Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics*. 2023;11:3317. DOI: 10.3390/math11153317.
- 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 Shishkin P. V., Malozyomov B. V. et al. Mathematical Logic Model for Controllability of Mining Equipment. *Mathematics*. 2024;12:1660. DOI: 10.3390/math12111660.

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)