

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

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

С. А. ВНУКОВ¹

Н. Д. ЕРЕЩЕНКО¹

¹Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Россия)

²Томский политехнический университет (Томск, Россия)

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ

Аннотация. Рассмотрена методика диагностической оценки надежности городского электротранспорта по совокупности электрических, тепловых, кинематических и эксплуатационных признаков. Предложен интегральный деградационный показатель, связанный с вероятностью безотказной работы и остаточным ресурсом. Показано, что совместный учет тепловой реакции токоприемного узла, деградации батареи и маршрутной нагрузки позволяет перейти от порогового контроля к ранжированию технического обслуживания.

Ключевые слова: электротранспорт, диагностика, надежность, остаточный ресурс, стохастическая модель, тяговая батарея, техническое состояние

Введение

Городской электротранспорт является технической системой с высокой плотностью энергетических, тепловых и информационных связей. Отказ тяговой батареи, преобразователя, токоприемного узла или тягового двигателя быстро приводит не только к техническому простоя, но и к нарушению графика движения. Поэтому диагностика должна рассматриваться не как разовая проверка параметров, а как непрерывная процедура оценки надежности и остаточного ресурса [1].

Один измеряемый параметр редко дает достаточное основание для вывода о предельном состоянии. Повышенная температура может быть следствием дефекта контакта или высокой нагрузки; рост тока может отражать профиль маршрута, а не деградацию; увеличение разброса напряжений ячеек зависит от температуры, степени заряда и истории циклирования [2,3]. Вследствие этого требуется объединение признаков разной физической природы в единую вероятностную процедуру.

Цель работы состоит в построении диагностической схемы, позволяющей по текущим данным эксплуатации получить интегральный индекс деградации, оценку вероятности безотказной работы, прогноз остаточного ресурса и класс инженерного решения. В отличие от простого порогового контроля схема

учитывает накопленное повреждение, качество данных и статистическую неоднородность маршрутов.

Материалы и методы

Для каждой единицы подвижного состава в момент времени t формируется вектор диагностических признаков $z(t)$, включающий электрические параметры тягового контура, температурные показатели, кинематические характеристики и признаки эксплуатационного контекста:

$$z(t) = [I(t), U(t), T(t), SOC(t), v(t), a(t), n_c(t), m(t), q_s(t)], \quad (1)$$

где I и U – ток и напряжение;

T – температура контролируемого узла;

SOC – степень заряда; v и a – скорость и ускорение;

n_c – число эквивалентных циклов;

m – эксплуатационная нагрузка;

q_s – показатель качества синхронизации и полноты данных.

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

Табл. 1. Группы диагностических признаков для оценки состояния электротранспорта

Группа признаков	Пример параметра	Диагностический смысл	Реакция модели
Электрические	$I, U, \Delta U_{cell}, R_{int}$	рост потерь, дисбаланс ячеек	рост батарейного или преобразовательного риска
Тепловые	$T_{max}, \Delta T$, скорость нагрева	контактные потери, ухудшение охлаждения	сокращение прогнозного ресурса
Кинематические	v, a , профиль торможения	отделение режима маршрута от дефекта	коррекция порога диагностики
Сервисные	ремонт, пробег, сезон	история обслуживания и внешняя среда	уточнение априорной вероятности отказа

В таблице представлено разделение физического происхождения признаков. Это снижает риск ложной диагностики, когда эксплуатационная перегрузка ошибочно интерпретируется как дефект узла.

Интегральный индекс деградации $D(t)$ вычисляется как нормированная взвешенная сумма частных диагностических отклонений:

$$D(t) = \sum w_i \cdot \phi_i(z_i(t)), \sum w_i = 1, \quad 0 \leq D(t) \leq 1, \quad (2)$$

где w_i – вес i -го признака;

φ_i – нормирующая функция, переводящая исходный параметр в безразмерный диагностический вклад.

Вероятность безотказной работы задается через модифицированную функцию интенсивности отказов

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right), \quad \lambda(t) = \lambda_0 \exp(\alpha D(t) + \beta T_+(t) + \chi n_c(t)), \quad (3)$$

где λ_0 – базовая интенсивность отказов;

$T_+(t)$ – превышение температуры над допустимым уровнем;

α, β, χ – коэффициенты чувствительности.

Такая постановка позволяет учитывать не только текущий уровень параметра, но и его накопленное действие.

На рис. 1 представлена общая логика обработки эксплуатационных данных от телеметрии до решения по обслуживанию.



Переход от разнородных измерений к ранжированию обслуживания

Рис. 1. Последовательность диагностической обработки данных электротранспорта

Из рисунка видно, что расчет ресурса не отделен от контроля качества данных. Это принципиально: при плохой синхронизации телеметрии модель должна расширять неопределенность прогноза, а не выдавать жесткое аварийное заключение.

Результаты диагностической обработки

Практическая интерпретация модели начинается с распределения индекса D . При малых значениях D узел считается работоспособным с высоким запасом; промежуточная зона используется для планирования углубленной проверки; высокие значения требуют ограничения эксплуатации или приоритетного обслуживания.

На рис. 2 показано распределение диагностического индекса с выделением предупредительной и критической областей.

Гистограмма показывает не только долю объектов в зоне риска, но и ширину переходной области. Именно переходная область наиболее ценна для надежного управления, поскольку позволяет перенести ремонт из аварийного режима в планируемый.

Связь индекса D с надежностью иллюстрируется семейством кривых безотказной работы. При одинаковой календарной наработке нагруженный маршрут и тепловая перегрузка дают существенно более быстрое снижение $R(t)$, чем легкий маршрут.

На рис. 3 сопоставлены расчетные траектории $R(t)$ для маршрутов с различной нагрузкой.

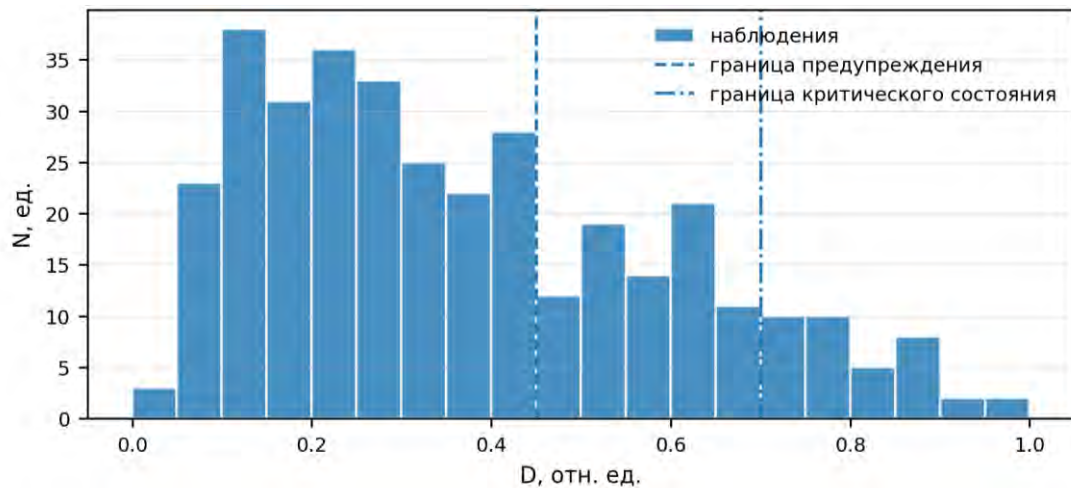


Рис. 2. Распределение интегрального индекса деградации в диагностической выборке

Главное наблюдение состоит в нелинейном расхождении кривых после накопления ресурса. Малое различие в начальный период эксплуатации трансформируется в значимое отличие по вероятности отказа на поздних стадиях.

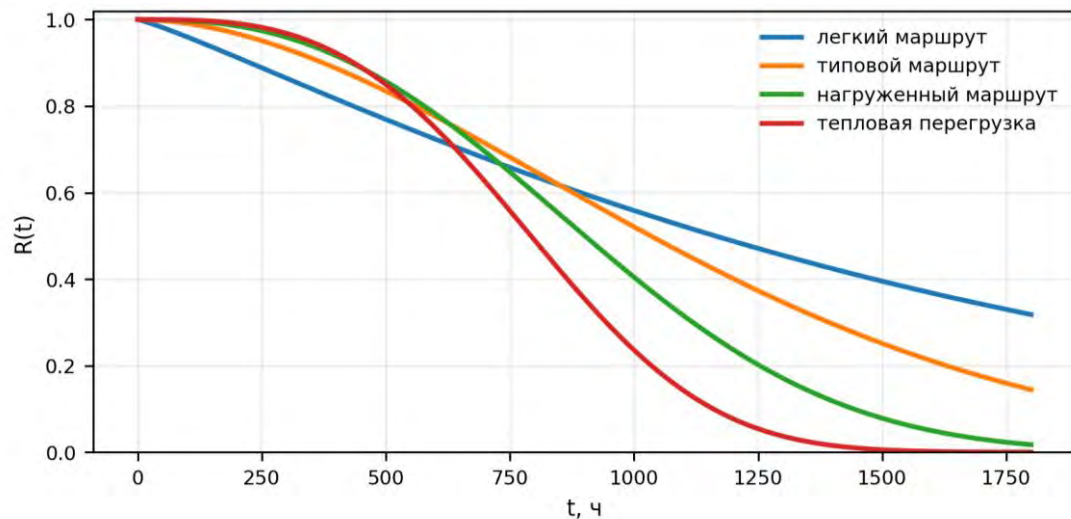


Рис. 3. Траектории вероятности безотказной работы для разных эксплуатационных групп

Отдельная проверка выполнена для токоприемного узла, поскольку его контактное состояние прямо влияет на тепловой режим и качество токосъема. На рис. 4 приведена зависимость температурного превышения от тока нагрузки.

На рис. 4 приведен дополнительный экспериментальный график: температурное превышение контактной зоны возрастает нелинейно при увеличении тока.

Значение графика состоит в том, что тепловое отклонение становится диагностически значимым не сразу, а после выхода в область повышенных токов. Поэтому фиксированный температурный порог следует применять вместе с информацией о нагрузочном режиме.

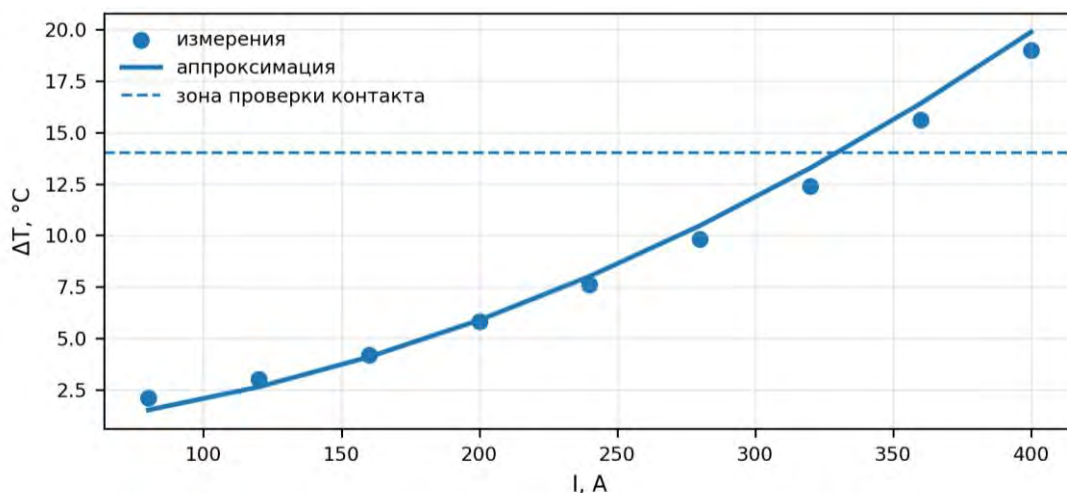


Рис. 4. Экспериментальная тепловая реакция токоприемного узла при росте тока

В Табл. 2 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 2. Пример статистической сводки по диагностическим состояниям

Класс состояния	Диапазон D	Доля наблюдений, %	Рекомендуемое действие
Норма	0,00–0,45	62,3	регламентный контроль
Предупреждение	0,45–0,70	26,8	углубленная проверка узла
Критическое состояние	0,70–1,00	10,9	приоритетное обслуживание

Сводка показывает, что большая часть наблюдений относится к нормальному режиму, однако почти треть требует не аварийного, а именно диагностически управляемого внимания. Это подтверждает смысл ранжирования парка по D.

Распределение риска по компонентам показывает, какие узлы формируют основной вклад в агрегированное состояние. При этом высокий вклад батареи не исключает локально опасных дефектов токоприемного или кабельного узла, поскольку последние имеют высокую скорость развития.

На рис. 5 отражено распределение относительного вклада узлов в суммарный риск.

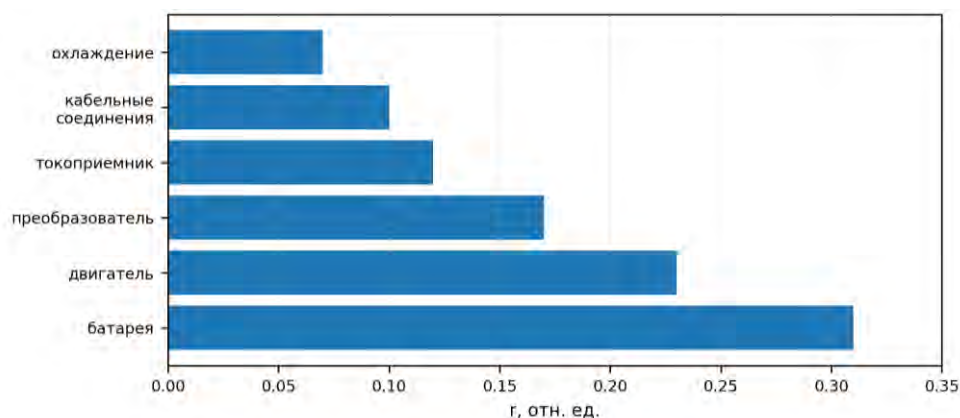


Рис. 5. Вклад основных узлов электротранспорта в агрегированный диагностический риск

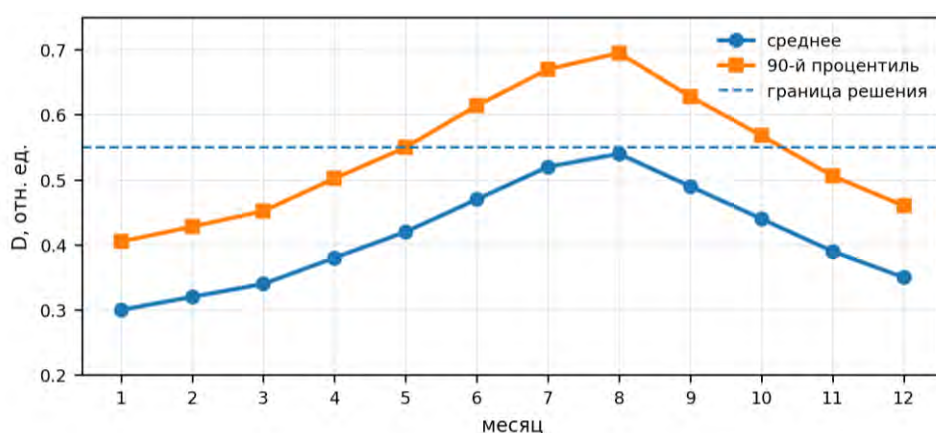


Рис. 6. Сезонная динамика диагностического индекса

Диаграмма показывает, что батарея и тяговый двигатель формируют более половины агрегированного риска. Однако кабельные соединения и охлаждение нельзя исключать из контроля: их вклад меньше по частоте, но выше по внезапности развития отказа. На рис. 6 показано изменение среднего значения и 90-го перцентиля D по месяцам.

Дополнительно оценена сезонная динамика диагностического индекса. В летний период средний уровень D и 90-й процентиль возрастают, что отражает усиление теплового фактора и повышение нагрузки на охлаждение.

Особенность графика состоит в расхождении среднего уровня и верхнего перцентиля летом. Это означает, что риск формируется не всем парком равномерно, а ограниченной группой машин с неблагоприятным сочетанием маршрута, температуры и технического состояния.

Обсуждение

Полученные зависимости показывают, что диагностическая оценка надежности электротранспорта должна быть многофакторной. Наиболее существенный результат состоит в переходе от единичного порога к вероятностному ранжированию. Такой подход не заменяет регламентную

проверку, но позволяет определить, какие транспортные единицы должны быть проверены первыми.

Ограничением предложенной схемы является необходимость корректной калибровки весов w_i и коэффициентов чувствительности. В условиях нового парка эти параметры следует задавать консервативно, а затем уточнять по мере накопления телеметрии и ремонтной статистики.

Выводы

Предложена диагностическая процедура оценки надежности и остаточного ресурса городского электротранспорта по совокупности эксплуатационных признаков. Показано, что интегральный индекс D позволяет объединить электрические, тепловые, кинематические и сервисные признаки в единую шкалу технического состояния.

Практическая ценность подхода состоит в выделении переходной зоны между нормой и критическим состоянием. Именно эта зона позволяет организовать профилактическое обслуживание до возникновения отказа и рационально распределить ресурсы диагностической службы.

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

Список литературы

1. Martyushev, N. V. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles / N. V. Martyushev, B. V. Malozyomov [et al.] // Mathematics. — 2023. — Vol. 11, No. 3. — Art. 536. — DOI: 10.3390/math11030536.
2. Martyushev, N. V. Review Models and Methods for Determining and Predicting Reliability of Technical Systems and Transport / N. V. Martyushev, B. V. Malozyomov [et al.] // Mathematics. — 2023. — Vol. 11, No. 15. — Art. 3317. — DOI: 10.3390/math11153317.
3. Martyushev, N. V. Reliability of Urban Electric Transport Running Autonomously through Diagnostic Parameters / N. V. Martyushev, B. V. Malozyomov [et al.] // World Electric Vehicle Journal. — 2023. — Vol. 14, No. 12. — Art. 334. — DOI: 10.3390/wevj14120334.

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)