

ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию: 08.09.2026

Статья принята к публикации: 13.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 629.3.014.2+621.833

Анализ факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность зубчатых передач редуктора электромобиля

Нусратова Нигина Рустамовна

инженер

ООО ADM Jizzakh

Республика Узбекистан, г. Джизак

E-mail: nusratova.nigina.17@gmail.com

Ишмуратов Хикмат Кахарович

PhD, проф.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Analysis of factors affecting the operational reliability of electric vehicle reduction-gear transmissions

Nusratova Nigina Rustamovna

Engineer, ADM Jizzakh LLC

Uzbekistan, Jizzakh

Ishmuratov Khikmat Kakharovich

PhD, Professor

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования – систематизировать эксплуатационные факторы, определяющие надёжность зубчатых передач редуктора электромобиля, и выделить параметры, которые целесообразно контролировать в последующих экспериментальных исследованиях. Методика основана на сравнительном анализе современных работ по высокоскоростным зубчатым передачам электромобильных трансмиссий и на расчётном исследовании для одноступенчатой передачи. Рассмотрены нагрузка, частота вращения, температура, условия смазывания, вибрация и износ. Для расчётной части принято число зубьев ведущей шестерни $z_1 = 24$; при изменении частоты вращения от 4 000 до 16 000 об/мин частота зацепления возрастает от 1600 до 6 400 Гц. Показано, что повышение скорости не следует оценивать

Библиографическое описание: Нусратова Н.Р., Ишмуратов Х.К. Анализ факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность зубчатых передач редуктора электромобиля // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23396>

изолированно: оно одновременно изменяет динамику зацепления, тепловой режим и требования к формированию смазочного слоя. Сформирована причинно-следственная схема «нагрузка и скорость – контактно-тепловые условия – смазывание – трение и износ – вибрация – надёжность». Практическая значимость работы состоит в выборе измеряемых параметров для будущего стендового исследования: крутящего момента, частоты вращения, температуры масла, вибрации и состояния поверхности зубьев. Предложенный подход может использоваться как исходная методика для оценки технического состояния и дальнейшего прогнозирования остаточного ресурса редуктора.

Abstract

The study aims to systematize operating factors governing the reliability of electric-vehicle reduction-gear transmissions and to identify parameters suitable for subsequent experimental monitoring. The method combines a comparative analysis of recent studies on high-speed EV gears with a transparent calculation study for a single-stage gear pair. Load, rotational speed, temperature, lubrication, vibration and wear are considered. For the calculation, the driving gear is assumed to have 24 teeth; increasing its speed from 4,000 to 16,000 rpm raises the gear-mesh frequency from 1,600 to 6,400 Hz. The analysis shows that speed should not be treated as an isolated factor because it simultaneously changes mesh dynamics, thermal conditions and lubricant-film requirements. A causal chain linking load and speed, contact and thermal conditions, lubrication, friction and wear, vibration, and reliability is proposed. The practical outcome is a set of parameters for future bench testing: torque, speed, oil temperature, vibration and tooth-surface condition. The approach can support further assessment of gearbox technical condition and residual-life prediction.

Ключевые слова: электромобиль, редуктор, зубчатая передача, надёжность, смазывание, износ, вибрация.

Keywords: electric vehicle, reduction gearbox, gear transmission, reliability, lubrication, wear, vibration.

Введение

Электрификация автомобильного транспорта изменяет условия работы механической части силового привода. В большинстве легковых электромобилей электрическая машина связана с ведущими колёсами через компактный редуктор, работающий в широком диапазоне частот вращения и при быстро меняющемся крутящем моменте. Для высокоскоростных передач это усиливает требования к состоянию поверхностей зубьев, смазыванию, отводу тепла и виброакустическим характеристикам [2, 3].

Редуктор электромобиля работает в широком диапазоне момента и частоты вращения. Снижение вязкости масла уменьшает потери, но повышает требования к смазочной плёнке [3], а старение масла изменяет его свойства [1].

Динамика зацепления зависит от зубцовой частоты, погрешностей профиля и контактной жёсткости; вибрация является важным диагностическим признаком [7, 8].

Цель работы – систематизировать факторы надёжности зубчатой передачи и расчётно оценить влияние частоты вращения на зубцовую частоту.

Материалы и методы

Объект исследования – зубчатая передача одноступенчатого редуктора электромобиля; предмет – влияние эксплуатационных факторов на её техническое состояние.

Проведён сравнительный анализ публикаций 2022–2026 гг. по высокоскоростным EV-передачам, смазыванию, вибрации и износу [1–10]. Факторы сгруппированы по схеме «воздействие – параметр – повреждение».

На втором этапе проведено расчётное исследование, не имитирующее конкретную серийную трансмиссию. Его задача – количественно показать влияние частоты вращения ведущей шестерни на частоту повторения контакта зубьев. Для модельной зубчатой пары принято число зубьев ведущей шестерни $z_1 = 24$. Частота зацепления определялась по выражению $f_m = z_1 \cdot n / 60$, где n - частота вращения ведущей шестерни, об/мин. Рассмотрены четыре режима: 4 000, 8 000, 12 000 и 16 000 об/мин. Такой расчёт не заменяет испытание на стенде и используется только как воспроизводимая оценка динамического возбуждения.

Результаты и обсуждение

Анализ источников выделил шесть основных факторов: нагрузку, частоту вращения, температуру, состояние смазочного материала, вибрацию и износ. Высокая скорость повышает требования к зубчатым колёсам, подшипникам и смазыванию [3], а испытания трансмиссионных масел подтверждают необходимость учитывать изменение их свойств в эксплуатации [1].

Для модельной шестерни с $z_1 = 24$ расчёт дал частоту зацепления 1 600 Гц при 4 000 об/мин, 3 200 Гц при 8 000 об/мин, 4 800 Гц при 12 000 об/мин и 6 400 Гц при 16 000 об/мин. Таким образом, четырёхкратное увеличение частоты вращения приводит к четырёхкратному росту частоты периодического зубцового возбуждения. Это не означает автоматического четырёхкратного роста износа, однако показывает, что число циклов контакта и спектральная область вибрации существенно меняются.

Таблица 1.

Связь эксплуатационных факторов с контролируемыми параметрами

Фактор	Физическое действие	Контролируемый параметр	Вероятное проявление
Нагрузка	Контактные напряжения и деформация	Крутящий момент	Усталость, pitting
Частота вращения	Частота контактов и динамическое возбуждение	об/мин, частота зацепления	Вибрация, тепловые потери
Температура	Изменение вязкости и условий плёнообразования	Температура масла	Рост трения/износа
Смазывание	Разделение контактирующих поверхностей	Состояние/вязкость масла	Scuffing, micropitting
Вибрация	Отражает динамику зацепления и дефекты	Ускорение, спектр	Диагностический признак
Износ	Изменение профиля и шероховатости	Состояние поверхности	Шум, вибрация, снижение ресурса

Полученная зависимость задаёт диапазон зубцовых частот для будущего вибрационного контроля; вибрацию следует оценивать совместно с нагрузкой и температурой [7, 8].

Смазочный материал снижает трение и участвует в отводе тепла. Для высокоскоростных EV-передатчиков свойства масла должны соответствовать конструкции и режиму работы редуктора [10, 3]; поэтому температуру масла целесообразно контролировать в эксперименте.

Сформирована причинная цепочка: нагрузка и скорость → контактно-тепловые условия → состояние смазочного слоя → трение и износ → вибрация и шум → снижение надёжности.

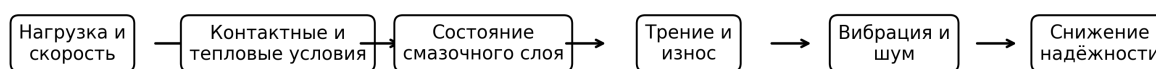


Рисунок 1. Причинно-следственная модель снижения эксплуатационной надёжности (составлено автором)

Заключение

1. Эксплуатационная надёжность зубчатой передачи редуктора электромобиля определяется совместным влиянием нагрузки, частоты вращения, температуры, смазывания, вибрации и износа; оценка одного параметра без учёта режима работы недостаточна.

2. Расчётное исследование для ведущей шестерни с 24 зубьями показало рост частоты зацепления с 1 600 до 6 400 Гц при увеличении частоты вращения с 4 000 до 16 000 об/мин. Полученный диапазон может использоваться при выборе параметров вибрационного контроля в последующих испытаниях.

3. В дальнейшем целесообразно синхронно регистрировать крутящий момент, частоту вращения, температуру масла и вибрацию, сопоставляя их с состоянием поверхности зубьев.

Список литературы

1. Barglik E., Stępień Z., Skibińska A., Krasodowski W. et al. Research and operational challenges of electric vehicles gear oils: Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 988. DOI: 10.1038/s41598-025-30653-7.
2. Dave S., Neufond J., Nordmann R., Rinderknecht S. A fundamental investigation of the interaction and impact of controlled torque ripples on gear mesh dynamics // Applied and Computational Mechanics. – 2023. – Т. 17, № 2. – P. 105–109. – DOI: 10.24132/acm.2023.838.
3. García-Tuero A., Ramajo B., Valbuena G.D. et al. Automatic Transmission Fluids in Electrified Transmissions: Compatibility with Elastomers: Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Art. 6213. DOI: 10.3390/app12126213.
4. König T., Cadau L., Steidle L. et al. A concept for comparison of new and aged lubricants in transmissions of electric vehicles and a method of oil aging on a test rig: Forschung im Ingenieurwesen. 2023. Vol. 87. P. 1069–1080. DOI: 10.1007/s10010-023-00705-3.
5. Newcomb T. A brief review of the rapid transformation of driveline lubricants for hybrid electric and electric vehicles: Frontiers in Mechanical Engineering. 2023. Vol. 9. Art. 1139385. DOI: 10.3389/fmech.2023.1139385.

6. Polák J. Investigation of Tooth Friction Conditions of Electric Vehicle Gearbox with Plastic Gears: Engineering Proceedings. 2024. Vol. 79. Art. 85. DOI: 10.3390/engproc2024079085.
7. Shi Z., Liu S., Yue H., Wu X. Noise analysis and optimization of the gear transmission system for two-speed automatic transmission of pure electric vehicles: Mechanical Sciences. 2023. Vol. 14. P. 333–345. DOI: 10.5194/ms-14-333-2023.
8. Zhang Q., Chen S., Yuan Y. et al. Analysis and optimization of vibration characteristics of planetary gear transmission for electric vehicles: Journal of Fujian University of Technology. 2023. Vol. 21, No. 6. P. 566–572. DOI: 10.3969/j.issn.1672–4348.2023.06.009.
9. Zhmud B., Merelli M. Modern Tools for Tribological Optimization of EV Transmissions and e-Axles: SAE Technical Paper 2024-24-0013. 2024. DOI: 10.4271/2024-24-0013.
10. Zhmud B., Najjari M., Brodmann B. The Effects of the Lubricant Properties and Surface Finish Characteristics on the Tribology of High-Speed Gears for EV Transmissions: Lubricants. 2024. Vol. 12, No. 4. Art. 112. DOI: 10.3390/lubricants12040112.