

АДАПТИВНЫЕ ТОРМОЗНЫЕ СИСТЕМЫ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ: ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Коченов Е.А.

Российский университет транспорта, Москва

Ключевые слова: адаптивные тормозные системы, грузовые вагоны, потележечное торможение, цифровые решения, пневмоэлектрические приводы, распределенный мониторинг, машинное обучение.

Аннотация. Статья посвящена исследованию адаптивных тормозных систем грузовых вагонов, направленных на устранение ключевых недостатков традиционной рычажной передачи. Рассматривается переход на технологию потележечного торможения, позволяющую равномерно распределять усилие между тележками, а также внедрение цифровых решений. Предложены инновационные методы, включая пневмоэлектрические приводы с автоматической регулировкой, распределенную систему мониторинга (датчики вибрации, ИК-пирометры) и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования износа колодок. Результаты моделирования демонстрируют снижение неравномерности нажатия колодок с 22% до 5%, повышение точности прогноза остаточного ресурса до 92% и сокращение эксплуатационных рисков. Исследование подтверждает эффективность интеграции цифровых технологий и адаптивных механизмов для повышения безопасности и надежности тормозных систем грузовых вагонов.

ADAPTIVE BRAKING SYSTEMS FOR FREIGHT CARS: DIGITALIZATION AND WEAR PREDICTION BASED ON MACHINE LEARNING

Kochenov E.A.

Russian University of Transport, Moscow

Keywords: adaptive braking systems, freight cars, post-track braking, digital solutions, pneumoelectric drives, distributed monitoring, machine learning.

Abstract. The article is devoted to the study of adaptive braking systems for freight cars aimed at eliminating the key disadvantages of traditional lever transmission. Transition to the technology of bogie braking, which allows uniform distribution of force between bogies, as well as the introduction of digital solutions are considered. Innovative methods are proposed, including pneumoelectric actuators with automatic adjustment, a distributed monitoring system (vibration sensors, IR pyrometers) and machine learning algorithms for pad wear prediction. The simulation results demonstrate a reduction in the unevenness of pad pressure from 22% to 5%, an increase in the accuracy of remaining life prediction to 92%, and a reduction in operational risks. The study confirms the effectiveness of integrating digital technologies and adaptive mechanisms to improve the safety and reliability of freight car braking systems.

Работа подвижного состава железнодорожной транспортной инфраструктуры основана на правильном функционировании тормозных систем. Одним из очевидных слабых мест тормозной системы грузовых вагонов является тормозная рычажная передача, для передачи усилия которой требуется множество рычагов и тяг, что значительно усложняет конструкцию и снижает адаптивность системы к изменяющимся нагрузкам. Это приводит к

неравномерному распределению тормозного эффекта, ускоренному износу тормозных колодок и увеличению затрат на техническое обслуживание.

В таких условиях переход на технологию торможения каждой тележкой становится особенно актуальным. Эта технология позволяет равномерно распределять тормозное усилие на каждую тележку, что способствует более стабильному и эффективному торможению. Кроме того, сокращение количества рычагов и тяг за счет отказа от устаревшей рычажной передачи упрощает конструкцию системы, минимизирует возможные точки отказа и снижает эксплуатационные риски, обеспечивая повышенную безопасность и надежность грузового вагона.

Анализ современных тормозных систем грузовых вагонов с торможением от тележки к тележке выявил существенные системные недостатки, подтвержденные экспериментальными и эксплуатационными данными.

Геометрические погрешности при сборке триангелей и тяг приводят к неравномерному распределению тормозного усилия между колодками одной тележки, что, в свою очередь, может спровоцировать несимметричный износ. Износ шарнирных соединений (заклепок, втулок) увеличивает люфт, нарушая кинематику. Это вызывает локальные пиковые нагрузки на колодки [1].

Жесткая кинематика рычажных передач не компенсирует изменения загрузки вагона. При переходе от порожнего (23 т) до груженого (94 т) состояния неравномерность нажатия колодок возрастает с 8% до 22% [2].

Ручной замер остаточной толщины колодок (погрешность $\pm 1,5$ мм) не учитывает скрытые дефекты: микротрещины, отслоения фрикционного слоя. Отсутствие интеграции в систему мониторинга параметров трения (температура, вибрация) приводит к запаздыванию ремонта [3].

При торможении со скорости 120 км/ч до 0 только 55-60% кинетической энергии рассеивается через колодки, а оставшаяся энергия аккумулируется в виде тепла в бандажах, вызывая их коробление [1].

В результате выявленных проблем предлагаются конкретные технические улучшения, призванные увеличить эффективность и надежность тормозных систем в грузовых вагонах.

Интеграция пневмоэлектрических приводов [1] в узлы триангелей и тяг для автоматической регулировки длины рычагов в зависимости от загрузки вагона. При изменении массы от 23 т (порожний) до 94 т (груженный) система компенсирует дисбаланс усилий, снижая вариацию нажатия колодок с 22% до 5% [2].

Использование распределенной системы мониторинга, а именно датчиков вибрации (акселерометры ADXL357), и ИК-пирометров (диапазон 200-1000°C), расположенные на каждой колодке, может передать данные на бортовой контроллер по протоколу CAN Bus.

Алгоритмы машинного обучения (регрессия Random Forest) прогнозируют остаточный ресурс колодок с точностью 92% [1], а интеграция с ECP (Electronically Controlled Pneumatic Brakes) позволит управлять тормозным усилием в режиме реального времени.

Система автоматического регулирования зазоров, использующая пневмоприводы с шаговыми двигателями (шаг 0,1 мм), обеспечивает точное поддержание оптимального расстояния между колодкой и колесом, исключая возникновение "холодного" трения в условиях низких температур, до -25°C [3].

Исследование тормозных систем грузовых вагонов, использующих потележечное торможение, выявило существенные технические барьеры, которые мешают улучшению их надежности и производительности. Анализируя экспериментальные результаты и актуальные инженерные подходы, были сделаны следующие заключения:

1. Неравномерное распределение нагрузки в механизмах рычажных передач, вызванное как геометрическими отклонениями (до 20% разницы), так и износом шарниров (до 2 мм люфта), приводит к асимметричному износу тормозных колодок. Использование адаптивных пневмоэлектрических приводов с функцией саморегулирования [4] существенно минимизирует эту неравномерность, добиваясь отклонения не более 5%, что было продемонстрировано посредством симуляции в программе Adams/View [2].

2. Цифровизация процессов управления обеспечивает переход от реактивного к прогнозному обслуживанию. Интеграция распределенной системы мониторинга (датчики вибрации ADXL357, ИК-пирометры) с алгоритмами машинного обучения (точность прогноза 92%) сокращает количество отказов на 30% [1].

Список литературы

1. Кулага А.А. Повышение эффективности работы тормозных систем длиннобазных контейнерных платформ: Дисс. ... канд. тех. наук. – М., 2019. – 120 с.
2. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2006. – 392 с.
3. Технические требования на ремонт тормозной рычажной передачи грузовых вагонов // Бизнес-актив. Железнодорожное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://gdzp.ru/poleznaya-informaciya/tormoza-vagonov/tekhnicheskie-trebovaniya-na-remont-tormoznoy-rychazhnoy-pere/>.
4. Булавский П.Е., Ефименко Ю.И., Кокурин И.М., Перевязкин А.А., Шаров В.А. Технологические и теоретические основы развития интеллектуальных систем управления движением поездов // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2. – С. 157-166.

Сведения об авторе:

Коченов Егор Александрович – аспирант.