

Чернышев Денис Олегович

кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспортно-технологических систем, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия

Журавель Никита Евгеньевич

студент Уральского государственного горного университета, УГГУ, г. Екатеринбург, Россия

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация. В статье рассматривается задача прогнозирования отказов электронных систем лесозаготовительных машин на основе анализа телеметрических данных. Проведен анализ существующих методов технического обслуживания и диагностики мобильной лесозаготовительной техники, выявлены их ограничения при эксплуатации в тяжелых производственных условиях. Предложен алгоритм интеллектуального анализа эксплуатационных параметров, позволяющий выявлять признаки развития неисправностей до возникновения аварийного отказа. Разработана последовательность обработки диагностической информации и предложены критерии формирования предупреждений о необходимости технического обслуживания. Рассмотрены перспективы применения разработанного алгоритма в составе цифровой платформы мониторинга лесозаготовительной техники.

Ключевые слова: лесозаготовительная машина, прогнозирование отказов, цифровизация, телеметрия, электронные системы, техническая диагностика, интеллектуальный анализ данных.

Annotation. The article considers the problem of predicting failures of electronic systems of logging machines based on the analysis of telemetric data. The analysis of existing methods of maintenance and diagnostics of mobile logging equipment is carried out, their limitations during operation in harsh industrial

conditions are revealed. An algorithm for intelligent analysis of operational parameters is proposed, which makes it possible to identify signs of malfunction development before an emergency failure occurs. A sequence of diagnostic information processing has been developed and criteria for the formation of warnings about the need for maintenance have been proposed. The prospects of using the developed algorithm as part of a digital monitoring platform for logging equipment are considered.

Keywords: logging machine, failure prediction, digitalization, telemetry, electronic systems, technical diagnostics, data mining.

Повышение эффективности эксплуатации лесозаготовительной техники является одной из актуальных задач предприятий лесного комплекса [1, с.18; 5, с.27]. Значительная часть простоев современных харвестеров и форвардеров обусловлена отказами электронных систем управления двигателем, гидравлическим оборудованием, исполнительными механизмами и бортовыми вычислительными устройствами.

Традиционные методы технического обслуживания основаны на выполнении регламентных работ через установленный интервал моточасов либо после появления признаков неисправности [4, с.115]. Такой подход не учитывает фактическое техническое состояние оборудования и может приводить как к преждевременной замене исправных узлов, так и к возникновению внезапных отказов.

Современные телематические системы позволяют получать значительный объем эксплуатационной информации, однако в большинстве случаев она используется только для контроля текущих параметров работы машины. Анализ изменения диагностических параметров во времени и прогнозирование отказов остаются недостаточно изученными направлениями.

Целью исследования является разработка алгоритма прогнозирования отказов электронных систем лесозаготовительных машин на основе анализа телеметрических данных.

В настоящее время применяются три основных подхода к организации технического обслуживания лесозаготовительных машин [2, с.84; 5, с.29]:

- обслуживание по регламенту;

- обслуживание после возникновения отказа;
- обслуживание по техническому состоянию.

Регламентное обслуживание отличается простотой организации, однако не учитывает реальные условия эксплуатации техники. Обслуживание после отказа сопровождается значительными потерями времени и высокими затратами на ремонт. Наиболее перспективным направлением является обслуживание по техническому состоянию, основанное на непрерывном мониторинге эксплуатационных параметров.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов технического обслуживания

Метод	Преимущества	Недостатки	Возможность прогнозирования
По регламенту	Простота планирования Легкость организации	Не учитывает фактическое состояние Возможность избыточных работ и затрат	Отсутствует
После отказа	Высокая точность Ремонт выполняется по факту	Длительные простои техники Высокие затраты на ремонт Риск повреждения смежных узлов	Отсутствует
По техническому состоянию	Учет реального состояния Оптимизация затрат Повышение надежности	Требует системы мониторинга Необходим анализ и обработка данных	Раннее выявление неисправностей

Анализ показывает, что существующие телематические системы ориентированы преимущественно на регистрацию параметров и диагностических кодов неисправностей. При этом отсутствует механизм автоматического анализа тенденций изменения параметров и формирования рекомендаций по предупреждению отказов.

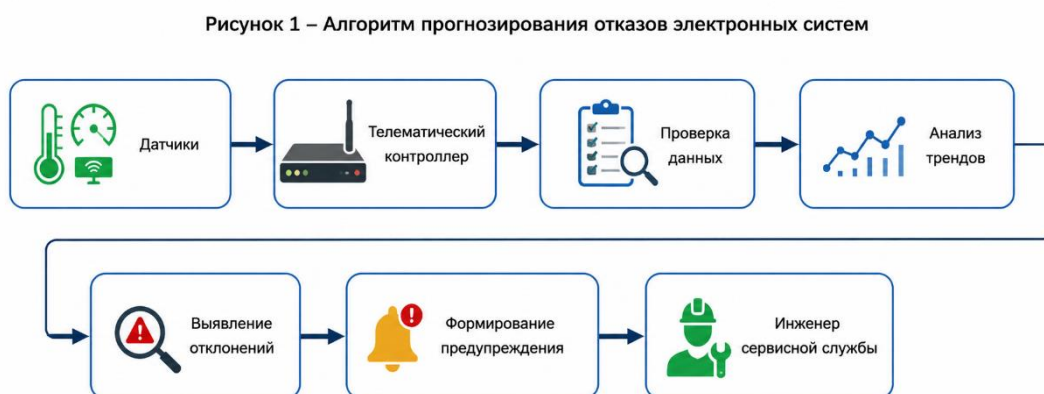
Предлагаемый алгоритм основан на последовательном анализе эксплуатационных параметров, поступающих от электронных блоков управления машины [6; 8, с.19].

Алгоритм включает следующие этапы:

- сбор телеметрической информации;
- проверку полноты и корректности данных;

- фильтрацию случайных выбросов;
- анализ изменения параметров во времени;
- выявление устойчивых отклонений;
- оценку вероятности возникновения отказа;
- формирование рекомендаций по техническому обслуживанию.

Рисунок 1 – Алгоритм прогнозирования отказов электронных систем



В отличие от традиционных методов диагностики предлагаемый алгоритм ориентирован не только на контроль текущего состояния, но и на выявление постепенной деградации оборудования.

Наиболее информативными для прогнозирования отказов являются параметры, характеризующие тепловые, электрические и гидравлические режимы работы машины [4, с.188; 5, с.31].

Таблица 2 – Диагностические параметры и признаки возможных неисправностей

Параметр	Возможный признак неисправности	Вероятная причина
Температура гидравлического масла	Постепенный рост	Износ гидронасоса Загрязнение фильтра
Давление гидросистемы	Медленное снижение	Утечки Износ насоса
Напряжение бортовой сети	Колебания	Неисправность генератора или аккумулятора
Количество ошибок ECU	Увеличение	Нарушение работы электронного блока
Температура охлаждающей жидкости	Рост	Неисправность системы охлаждения

Использование нескольких параметров одновременно позволяет повысить достоверность диагностики и снизить вероятность ложных предупреждений.

Предлагаемый алгоритм может использоваться совместно с цифровой системой мониторинга, разработанной в первой статье. После поступления телеметрических данных выполняется их автоматическая обработка и анализ изменения диагностических параметров.

Если система фиксирует устойчивое повышение температуры гидравлического масла одновременно со снижением давления в гидросистеме и увеличением количества диагностических сообщений, формируется предупреждение о необходимости проведения внеплановой диагностики.

Такой подход позволяет выявлять потенциальные неисправности до возникновения аварийного отказа и своевременно планировать проведение технического обслуживания.

Рисунок 2 – Последовательность обработки телеметрической информации



Предлагаемый алгоритм отличается от существующих решений использованием анализа динамики изменения параметров и формированием рекомендаций на основе совокупности диагностической информации [10, с.1495; 12, с.164].

Таблица 3 – Сравнение существующих систем мониторинга и предлагаемого алгоритма

Критерий	Стандартные телематические системы	Предлагаемый алгоритм
Передача телеметрии	Да	Да
Регистрация ошибок	Да	Да
Анализ трендов	Ограниченно	Да
Формирование предупреждений	Нет	Да
Поддержка принятия решений	Нет	Да
Прогнозирование отказов	Нет	Да

Таблица 4 – Диагностические признаки наиболее распространенных неисправностей электронных систем

Неисправность	Диагностический признак	Возможные последствия	Рекомендуемые действия
Износ гидронасоса	Снижение давления	Потеря производительности	Диагностика гидросистемы
Загрязнение фильтра	Рост температуры масла	Перегрев гидросистемы	Замена фильтра
Неисправность генератора	Колебание напряжения	Отказ электрооборудования	Проверка генератора
Неисправность датчика	Некорректные показания	Ошибки управления	Проверка соединений
Перегрев двигателя	Рост температуры охлаждающей жидкости	Остановка двигателя	Проверка системы охлаждения

Полученные результаты сравнения и диагностические признаки показывают, что использование алгоритма интеллектуального анализа позволяет расширить функциональные возможности существующих телематических систем без существенного изменения аппаратной части машины и позволяют сформировать базу правил для интеллектуального анализа эксплуатационных данных и последующего прогнозирования возможных отказов электронных систем лесозаготовительной машины [3, с.126; 13].

В статье предложен алгоритм прогнозирования отказов электронных систем лесозаготовительных машин, основанный на анализе телеметрических данных и динамики изменения эксплуатационных параметров. Выполнен анализ существующих методов технического обслуживания, выявлены их

ограничения и обоснована необходимость перехода к обслуживанию по техническому состоянию.

Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции предложенного алгоритма в существующие цифровые платформы мониторинга лесозаготовительной техники. Использование разработанного подхода позволит повысить надежность эксплуатации машин, сократить продолжительность простоев и обеспечить более эффективное планирование технического обслуживания.

В дальнейшем предполагается расширение алгоритма за счет применения методов статистического анализа и накопления эксплуатационной базы данных, что позволит повысить точность прогнозирования и создать основу для разработки цифрового двойника лесозаготовительной машины.

Список литературы

1. Бартенев И. М., Попиков П. И. Машины и оборудование лесного комплекса. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 412 с.
2. Попиков П. И., Драпалюк М. В. Цифровизация технологических процессов лесного комплекса // Лесотехнический журнал. 2022. № 4. С. 82–94.
3. Соколов А. В., Кузнецов П. И. Современные системы мониторинга технического состояния лесозаготовительных машин // Известия вузов. Лесной журнал. 2023. № 5. С. 118–131.
4. Котельников В. А., Бартенев И. М. Надежность электронных систем мобильных машин. Воронеж: ВГЛТУ, 2020. 356 с.
5. Драпалюк М. В., Попиков П. И. Автоматизация и цифровизация лесозаготовительного производства // Лесотехнический журнал. 2024. № 1. С. 25–39.
6. ISO 15143-3:2020. Earth-moving machinery and mobile equipment — Telematics data framework.
7. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems // Manufacturing Letters. 2015. Vol. 3. P. 18–23.
8. Carvalho T. P. et al. A Systematic Literature Review of Machine Learning Methods Applied to Predictive Maintenance // Computers & Industrial Engineering. 2019. Vol. 137.
9. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. Condition-Based Maintenance: A Review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20. No. 7. P. 1483–1510.
10. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Springer, 2017.
11. Tao F., Qi Q. Digital Twin Driven Smart Manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. 2019. Vol. 48. P. 157–169.

- 12.Li C., Mahadevan S. Intelligent Diagnostics for Industrial Equipment // Reliability Engineering & System Safety. 2021.
- 13.Zhang Y. Predictive Maintenance Technologies for Mobile Machinery // Applied Sciences. 2022.
- 14.Wang H. Intelligent Monitoring of Heavy Mobile Equipment // Sensors. 2023.