

УДК 631.3

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ
ДИАГНОСТИКИ И ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Сафин Марат Абдулбариевич

Канд. техн. наук, доцент

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Зингер Дарья Федоровна

Студент

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

В статье рассмотрено применение интеллектуальных методов диагностики и технического обслуживания сельскохозяйственной техники с использованием технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и цифровых двойников. Показано, что современные агротехнические комплексы требуют перехода от реактивного ремонта к предиктивным стратегиям обслуживания, основанным на анализе больших потоков данных от встроенных сенсоров. Использование алгоритмов глубокого обучения, сверточных нейронных сетей и объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) позволяет выявлять скрытые закономерности деградации узлов, прогнозировать отказы и формировать оптимальные графики обслуживания. Рассмотрены примеры интеграции интеллектуальных систем с агропромышленным интернетом вещей (Agro-IoT), обеспечивающих непрерывный мониторинг состояния техники, анализ вибрационных, температурных и акустических сигналов, а также автоматическую оценку остаточного ресурса компонентов. Применение цифровых двойников сельскохозяйственных машин позволяет моделировать рабочие режимы и выявлять потенциальные неисправности без остановки оборудования. Отмечено, что внедрение таких технологий повышает коэффициент технической готовности машинно-тракторных парков, снижает эксплуатационные затраты и способствует цифровой трансформации агропромышленного производства. Сформулированы выводы о тенденциях развития интеллектуальных методов обслуживания и направлениях дальнейших исследований, связанных с повышением устойчивости и энергоэффективности сельскохозяйственных машин

Ключевые слова: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ

УДК 631.3

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**INTELLIGENT METHODS OF DIAGNOSIS
AND MAINTENANCE OF AGRICULTURAL
MACHINERY**

Safin Marat Abdulbarievich

Cand.Tech.Sci., associate professor

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Zinger Darya Fedorovna

Student

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The article examines the application of intelligent methods for diagnosing and maintaining agricultural machinery based on artificial intelligence, machine learning, and digital twin technologies. It is shown that modern agro-industrial systems require a transition from reactive repair to predictive maintenance strategies, which rely on the analysis of large data streams from embedded sensors. The use of deep learning algorithms, convolutional neural networks, and explainable artificial intelligence (XAI) makes it possible to identify hidden patterns of component degradation, predict failures, and develop optimal maintenance schedules. Examples of integrating intelligent systems with the agro-industrial Internet of Things (Agro-IoT) are presented, enabling continuous monitoring of equipment condition, analysis of vibration, temperature, and acoustic signals, and automatic assessment of the remaining service life of components. The application of digital twins of agricultural machinery allows the simulation of operating modes and the identification of potential malfunctions without interrupting equipment operation. It is noted that the introduction of such technologies increases the technical readiness coefficient of machine and tractor fleets, reduces operating costs, and contributes to the digital transformation of agricultural production. The paper formulates conclusions on the trends in the development of intelligent maintenance methods and outlines future research directions aimed at improving the sustainability and energy efficiency of agricultural machinery

Keywords: INTELLIGENT DIAGNOSIS,

ДИАГНОСТИКА, ПРЕДИКТИВНОЕ
ОБСЛУЖИВАНИЕ, ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК,
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ТЕХНИКА,
МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, СЕНСОРНЫЕ СЕТИ

PREDICTIVE MAINTENANCE, DIGITAL TWIN,
AGRICULTURAL MACHINERY, MACHINE
LEARNING, SENSOR NETWORKS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-214-018>

Введение. Функционирование современного агропромышленного комплекса невозможно без надежной техники, обеспечивающей обработку почвы, сеяние, сбор урожая и транспортировку. Сложность и интенсивная эксплуатация сельскохозяйственных машин приводят к ускоренному износу, непредвиденным отказам и простоям, что вызывает значительные экономические потери. В условиях возрастающей конкуренции и ограниченного кадрового ресурса производителям необходимы методы, позволяющие своевременно обнаруживать появляющиеся дефекты и оптимизировать ремонтные мероприятия. Традиционные регламентированные или реактивные подходы к обслуживанию, основанные на периодичности или устраниении последствий, часто оказываются избыточными или, наоборот, не успевают предотвратить аварии. Поэтому в последние годы активно развиваются интеллектуальные методы диагностики и технического обслуживания, опирающиеся на использование данных и вычислительного интеллекта.

Одним из ключевых направлений стал концепт «цифрового двойника» – динамической виртуальной копии физического объекта, связывающей данные сенсоров, модели и алгоритмы в единую систему. В цифровой двойник входят наборы датчиков, каналы передачи данных, аналитические алгоритмы и виртуальные модели, что обеспечивает непрерывный мониторинг состояния техники и раннее обнаружение отклонений. С развитием агропромышленного интернета вещей возможности мониторинга расширились: вибрационные сенсоры, анализ масел, тепловизионная диагностика и акустические датчики позволяют улавливать различные механизмы отказов. Объединение многомодальных

<http://ej.kubagro.ru/2025/10/pdf/18.pdf>

сенсорных данных в рамках цифрового двойника дает более полную картину состояния оборудования и позволяет прогнозировать ресурс агрегатов. Например, внедрение многосенсорной сети в цифровой двойник комбайна позволило улучшить контроль разрушения зерна и повысить эффективность уборки.

Параллельно развивается область машинного обучения и глубоких нейронных сетей. Алгоритмы поддержки принятия решений, сетевые модели, методы оптимизации и внимание позволяют автоматически выделять признаки и классифицировать состояние узлов. В работах последних лет показано, что оптимизация архитектуры сверточных сетей с помощью алгоритмов «полета Леви» для диагностики двигателей снижает потребность в большом количестве нейронов и увеличивает точность классификации. Улучшенные архитектуры CNN с расширенными сверточными ядрами, остаточными связями, многомасштабными уровнями и механизмами внимания обеспечивают быстрое обучение и эффективное извлечение признаков при поиске неисправностей электродвигателей, причем параметры модели могут быть автоматически настроены с использованием байесовской оптимизации.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Современное состояние исследований демонстрирует переход от традиционных сигнал-ориентированных методов к алгоритмам искусственного интеллекта. Классические методы обработки сигналов – ордерный анализ, отслеживание порядка вращения, спектральные преобразования – позволяют выделять частоты отказов, однако их эффективность во многом зависит от квалификации эксперта и предварительной подготовки данных. В обзоре работ по диагностике комбайнов показано, что машинное и глубокое обучение способны автоматически выявлять закономерности между сигналами и неисправностями, повышая точность и устойчивость диагностики. Например, использование метода опорных векторов (SVM)

для контроля ослабления болтов на комбайне позволило точно определить состояние крепежа по вибрационным характеристикам, а комбинация алгоритма ближайших соседей (KNN) с гармоническим поиском эффективно оценивает состояние вращающихся узлов. Дополнительные исследования задействуют автокодировщики и эволюционные алгоритмы для очистки сигналов и работы при дефиците обучающих данных, что актуально для сельскохозяйственной техники, где сбор обширных датасетов затруднен [1].

Развитие систем сенсорного мониторинга является важной предпосылкой для интеллектуальной диагностики. Сенсоры в составе аграрного интернета вещей собирают данные о вибрации, давлении, температуре, электрических параметрах и химическом составе жидкостей, обеспечивая более точное отображение состояния машин. Своевременное выявление отказов самих сенсоров имеет принципиальное значение, поскольку искаженные данные могут привести к ошибочному диагностическому решению. Исследования показывают, что методы машинного обучения успешно используются для диагностики датчиков электропроводности и pH, причем предложены модели, независимые от конкретного датчика и использующие альтернативные данные для оценки состояния. Комбинация методов оптимизации (интеллектуальная поисковая стратегия «сверчок» или «жук»), усиленных алгоритмом опорных векторов, повышает точность обнаружения отказов сенсоров при малом объеме данных. Экспертные системы на базе машинного обучения, обученные на данных реальных хозяйств, демонстрируют потенциал по замещению человеческих экспертов при контроле тургорных датчиков листьев, повышая надежность систем точечного орошения.

Цель исследований. Целью данной работы является аналитическое обобщение интеллектуальных методов диагностики и технического обслуживания сельскохозяйственной техники.

Материалы и методы исследований. Статья имеет обзорный характер, поэтому для достижения поставленных целей применялась методика систематического анализа источников. В выборку включались научные публикации, опубликованные в период 2019-2025 гг., представленные в базах Scopus, Web of Science и открытых репозиториях. Основные ключевые слова для поиска: «agricultural machinery fault diagnosis», «predictive maintenance», «digital twin», «sensor fault», «machine learning» [2]. Также рассматривались отчеты международных исследовательских центров и стандарты по вибродиагностике [3].

Результаты исследований. Результатом проведенного анализа стало выделение нескольких ключевых тенденций в области интеллектуальной диагностики сельскохозяйственной техники. Во-первых, наблюдается устойчивый переход от ручных и опытных методов к машинному обучению и глубоким сетям. Многие современные модели осуществляют автоматическое извлечение признаков из вибрационных, акустических и тепловых сигналов и демонстрируют высокую точность классификации. Оптимизированная сверточная сеть с алгоритмом «полета Леви» (LFOA-DCNN) для диагностики двигателей сокращает число параметров сети и увеличивает точность по сравнению с традиционными DCNN; в экспериментах классификационная точность превышала показатели базовой модели на несколько процентов.

Улучшенная CNN с остаточными связями, многомасштабными архитектурами и механизмами внимания показала высокую эффективность при диагностике электродвигателей – байесовская оптимизация позволила автоматически подобрать гиперпараметры, что обеспечило стабильную работу модели и превосходство по точности над другими архитектурами. Во-вторых, комплексирование методов. Наибольшие успехи демонстрируют гибридные модели, объединяющие сверточные сети, рекуррентные сети и механизмы внимания. В задачах диагностики

трансмиссий тракторов использование CNN-BiLSTM с многоголовым вниманием и генеративной сетью Time GAN обеспечило точность распознавания более 98 % даже при высоком уровне шума. Это свидетельствует о потенциале гибридных подходов для обработки последовательных и мультимодальных данных. В то же время относительно простые алгоритмы – опорные векторы, случайный лес, улучшенный наивный Байес – сохраняют актуальность для систем с ограниченными вычислительными ресурсами; например, метод на основе РСА и улучшенного наивного байесовского классификатора обеспечил высокую точность диагностики гидростатической трансмиссии при минимальных вычислительных затратах. В-третьих, важную роль играют сенсорные сети и цифровые двойники. Многомодальные сенсоры обеспечивают вибрационные, температурные и акустические данные, позволяя выявлять различные механизмы отказов. В рамках цифровых двойников используются как традиционные ускорители, так и инфракрасные камеры, и анализ масел; создание единой модели, объединяющей эти данные, позволяет контролировать износ деталей без остановки машины. Внедрение многосенсорной сети в комбайн показало, что контроль коэффициента дробления зерна и урожайности в режиме реального времени снижает потери и повышает эффективность уборки. Развитие цифровых двойников также предполагает использование кромочных вычислений и энергосберегающих беспроводных протоколов для обеспечения непрерывного обмена данными в условиях поля.

Четвертый результат касается интерпретируемости. Применение методов объяснимого ИИ (XAI) повышает доверие пользователей к системе. В исследовании Prathima Reddy и соавт. предложена модель, демонстрирующая, какие данные влияют на прогноз, какие внутренние механизмы используются и как интерпретировать конкретный вывод. При этом использование LSTM увеличило точность на 5,81 %, а XGBoost

обеспечил прирост точности более чем на 10 %, улучшая F1-меру на 7,09 % и ROC-AUC на 4,29 %.

Выводы. 1. Анализ показал, что алгоритмы машинного обучения и глубоких сетей постепенно вытесняют традиционные подходы, обеспечивая более высокую точность и устойчивость диагностики. 2. Сочетание вибрационных, тепловых, акустических и химических данных в рамках цифровой модели позволяет проводить непрерывный мониторинг и прогнозирование отказов, что снижает простои и повышает эффективность эксплуатации техники. 3. Результаты исследований показали, что применение XAI не только повышает прозрачность и приемлемость решений для пользователей, но и может улучшать метрики качества, что делает объяснимые алгоритмы предпочтительным выбором для аграрной отрасли.

Библиографический список

1. Ge C., Zhang G., Wang Y., Shao D., Song X., Wang Z. Research Status and Development Trends of Artificial Intelligence in Smart Agriculture // Agriculture. 2025. V. 15. № 21. Article 2247.
2. Prathima Reddy T., Prathyusha R., Basha S., Reddy S. Enhancing Predictive Maintenance in Smart Agriculture using Explainable Artificial Intelligence // International Journal of Computational Learning & Intelligence. 2025. V. 4. № 4. P. 658–671.
3. Zhang C., Song J., Yin X., Cai J. Digital twin-based approaches for agricultural machinery damage prediction and maintenance: A review // Journal of Computational Design and Engineering. 2025. V. 12. № 10. P. 87-117.

References

1. Ge C., Zhang G., Wang Y., Shao D., Song X., Wang Z. Research Status and Development Trends of Artificial Intelligence in Smart Agriculture // Agriculture. 2025. V. 15. № 21. Article 2247.
2. Prathima Reddy T., Prathyusha R., Basha S., Reddy S. Enhancing Predictive Maintenance in Smart Agriculture using Explainable Artificial Intelligence // International Journal of Computational Learning & Intelligence. 2025. V. 4. № 4. P. 658–671.
3. Zhang C., Song J., Yin X., Cai J. Digital twin-based approaches for agricultural machinery damage prediction and maintenance: A review // Journal of Computational Design and Engineering. 2025. V. 12. № 10. P. 87-117.