

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. **А. С. Дорохов**, доктор технических наук, академик РАН, **Ю. В. Катаев**, кандидат технических наук, **М. Н. Костомакхин**, кандидат технических наук, **Н. А. Петрищев**, кандидат технических наук, **Е. В. Пестряков**, **А. С. Саяпин**

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ;  
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5  
E-mail: dorokhov.vim@yandex.ru

*Исследования проводили с целью обоснования разработки устройств и программного обеспечения по управлению техническим состоянием сельскохозяйственной техники с использованием элементов искусственного интеллекта. Применение искусственного интеллекта позволяет внедрить стратегию предиктивного технического обслуживания и ремонта техники  $C_3$  – комплексного подхода, позволяющего определить состояние находящейся в эксплуатации машины, и оценить, когда следует провести техническое обслуживание. Для этого необходимо разработать электронные диагностические устройства и датчики, которые можно объединить в один интеллектуальный информационный комплекс, позволяющий оперативно собирать и обрабатывать большие объемы данных по параметрам технического состояния сельскохозяйственной техники благодаря использованию искусственного интеллекта. Объект исследования – гидромеханическая коробка перемены передач трактора «Кировец». В 2022–2024 гг. были разработаны устройства сбора данных, программное обеспечение и методики оценки технического состояния машин, использующие алгоритмы искусственного интеллекта и нейронных сетей, а также описаны изготовленные цифровые диагностические устройства. На примере анализа параметров работы гидромеханической коробки передач трактора «Кировец» конкретизировано вводимое понятие технического состояния (номинальное, допустимое, предельное или аварийное), которое основано на расчете с использованием нейронной сети параметра  $Y_n$ , определяющего тип возможных работ и сервисного обслуживания. Благодаря мониторингу и анализу параметров работы коробки передач с применением ИИ и непрерывной актуализации технического состояния своевременно проводится техническое обслуживание и ремонт, что обеспечивает управление техническим состоянием и повышение надежности сельскохозяйственных машин, минимизирует отказы и связанные с ними простои техники.*

## MANAGEMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF AGRICULTURAL MACHINERY USING DIGITAL TECHNOLOGIES

**A.S. Dorokhov, Yu. V. Kataev, M. N. Kostomakhin, N. A. Petrishchev, E. V. Pestryakov, A. S. Sayapin**

Federal Scientific Agricultural Engineering Center of All-Russian Mechanization Institute,  
109428, Moskva, 1-i Institutskii proezd, 5  
E-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;

*The studies were conducted to substantiate the development of devices and software for managing the technical condition of agricultural machinery using elements of artificial intelligence. The use of artificial intelligence makes it possible to implement a strategy for predictive maintenance and repair of  $C_3$  equipment – an integrated approach that allows you to determine the condition of a machine in operation and estimate when maintenance should be carried out. To do this, it is necessary to develop electronic diagnostic devices and sensors that can be combined into a single intelligent information complex that allows you to quickly collect and process large amounts of data on the parameters of the technical condition of agricultural machinery through the use of artificial intelligence. The object of the study is the hydromechanical gearbox of the Kirovets tractor for agricultural and industrial purposes. In 2022–2024, developed data collection devices, software and methods for assessing the technical condition of machines using artificial intelligence and neural network algorithms, and also described the manufactured digital diagnostic devices. Using the example of analyzing the operating parameters of the hydromechanical gearbox of the Kirovets tractor, the introduced concept of technical condition is specified, which consists in calculating the  $Y_n$  parameter using a neural network, characterizing the nominal, permissible, limiting or emergency technical condition, and establishing recommendations to the owner on the type of possible work and service. Thanks to monitoring and analyzing the operating parameters of the gearbox using AI and continuous updating of the technical condition, technical maintenance and repair are carried out in a timely manner, which ensures technical condition management and increased reliability of agricultural machinery, minimizes failures and related equipment downtime.*

**Ключевые слова:** сельскохозяйственная техника, диагностика, управление надежностью, искусственный интеллект, мониторинг технического состояния, цифровые технологии, нейронные сети.

**Keywords:** agricultural machinery, diagnostics, reliability management, artificial intelligence, technical condition monitoring, digital technologies, neural networks.

Для повышения эффективности сельскохозяйственного производства, снижения доли материальных затрат в себестоимости единицы сельскохозяйственной продукции на 20 % и более, необходимо внедрение цифровых инструментов для использования информационных ресурсов, платформ и технологий на сельскохозяйствен-

ных объектах. Повышение эффективности эксплуатации техники путем снижения сверхнормативных затрат на техническое обслуживание и ремонт [1] позволит повысить рентабельность сельхозтоваропроизводителей [2].

Для эффективного управления техническим состоянием эксплуатируемой в агропромышленном комплексе

(АПК) техники необходим переход от стратегии технического обслуживания, регламентированного в зависимости от наработки ( $C_2$ ), к стратегии обслуживания по состоянию с непрерывным контролем ( $C_3$ ) благодаря внедрению цифровых технологий мониторинга и самодиагностики [3]. Это позволит оптимизировать процессы исходя из фактического состояния, реализовать методологию надежности-ориентированного технического обслуживания (RCM) и обеспечения безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS) машин [4].

Наиболее перспективное направление для оценки и управления техническим состоянием сельскохозяйственной техники – использование технологий искусственного интеллекта (ИИ) и нейронных сетей (НС) [5]. НС могут самообучаться на данных от датчиков технического мониторинга машин, выявлять закономерности и принимать решения без явно заданных правил, что позволяет использовать их для распознавания образцов, состояний, управления процессами, связанными с обработкой больших объемов данных. Это дает возможность исключить сложные аналитические методики планирования технического обслуживания и ремонта согласно стратегии  $C_2$ , которые применяли ранее.

Для управления техническим состоянием сельскохозяйственной техники необходимо внедрение системы цифрового мониторинга и самодиагностики [6]. Для этого следует разработать устройства, которые устанавливаются непосредственно на сельскохозяйственную технику и решают задачи сбора информации, первичного анализа и непосредственного управления в случае нарушений правил эксплуатации; программное обеспечение и технические средства анализа полученной информации для оценки текущего состояния и формирования прогноза дальнейшей эксплуатации.

С экономической точки зрения управление техническим состоянием сельскохозяйственной техники путем внедрения цифровых технологий позволит оптимизировать использование технического ресурса, увеличить фактическую межремонтную наработку на 20...30 %, снизить затраты на сложный ремонт и простои техники на 15...20 %, снизить частоту отказов за срок службы в 2...3 раза, что повысит рентабельность сельскохозяйственного производства и конкурентоспособность продукции [6].

Цель исследования – разработка информационно-диагностических средств и программного обеспечения мониторинга параметров работы, обработки накопленных данных, определения технического состояния контролируемой машины, узла или агрегата с последующим управлением их техническим состоянием для внедрения стратегии  $C_3$  предиктивного технического обслуживания и ремонта с использованием ИИ.

**Методика.** Основные задачи использования ИИ и НС в целях получения максимального эффекта в области управления техническим состоянием по заранее выбранному критерию (экономическому, технологическому) заключаются в следующем: сбор данных о параметрах работы машины, узла или агрегата [7]; обработка и анализ полученных данных с использованием ИИ с целью определения текущего актуального технического состояния контролируемого объекта; прогнозирование динамики изменения технического состояния объекта [3]; подготовка или принятие решения (выдача командной информации) об изменении параметров работы и регулировок или необходимости проведения технического обслуживания или ремонта.

Однако при достаточной теоретической и методической проработанности диагностики по переходным процессам для оценки технического состояния с использованием ИИ и НС на сегодняшний день отсутствуют прикладные инструментальные средства, которые можно было бы интегрировать в систему мониторинга для реализации стратегии технического обслуживания и ремонта  $C_3$  [8].

Для мониторинга технического состояния отдельных узлов и агрегатов целесообразно применять функциональные методы диагностирования, которые основаны на анализе и интерпретации работы непосредственно в процессе эксплуатации [2]. Их комбинированное использование позволяет создать комплексную систему мониторинга и поддержания работоспособности сельскохозяйственной техники путем установки средств диагностирования и датчиков для сбора данных о техническом состоянии, а анализ данных с применением алгоритмов ИИ помогает оценить общее техническое состояние и обосновать необходимость ремонтно-обслуживающих воздействий [9].

Рассмотрим функциональные методы на примере диагностирования гидромеханической коробки передач (КП) трактора «Кировец». Сбор данных о параметрах работы с использованием датчиков и записывающих устройств проводится непрерывно во время работы машины. Основным диагностическим устройством при этом служит разработанное в ФНАЦ ВИМ устройство для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния КП. Оно осуществляет опрос датчиков температуры, давления и акселерометра в течение 1 с частотой 200 Гц в момент, когда давление в КП при переключении передачи снижается до 0,9 от номинального рабочего давления, в результате чего формируется таблица значений давлений и ускорений, в которой осуществляется поиск максимального и минимального давлений, максимального ускорения торможения и времени переходного процесса восстановления давления. Далее из найденных значений формируется таблица данных для нейросетевого анализа, в которую добавляются показатели других факторов, влияющих на работоспособность КП, например: температура масла в КП при переключении; температура воздуха окружающей среды; минимальное давление масла в КП при переключении; максимальное ускорение разгона трактора при переключении передачи; максимальное ускорение замедления трактора при переключении передачи; время восстановления давления в КП; время падения давления в КП до минимума; скорость вращения ведущего вала КП; номер включаемой передачи.

В перспективе этот набор значений может быть дополнен данными от дополнительных датчиков: разницы температур в радиаторе КП; давления рабочей жидкости в гидроаккумуляторе, во всасывающей магистрали насоса; вибрации корпуса КП; скоростей вращения входного и выходного валов; положения бустеров фрикционных узлов.

Интеллектуальный программный комплекс для FMEA-анализа, разработанный во ФНАЦ ВИМ для управления техническим состоянием сельскохозяйственной техники, включает в себя экспериментальные цифровые средства для сбора данных и контроля загрузки узлов и агрегатов в процессе эксплуатации машины, а также бортовые системы диагностирования и прогнозирования технического состояния с использованием функциональных методов диагностирования (рис. 1).

Для записи, передачи и хранения данных о работе узлов и агрегатов машин разработана схема, в которой

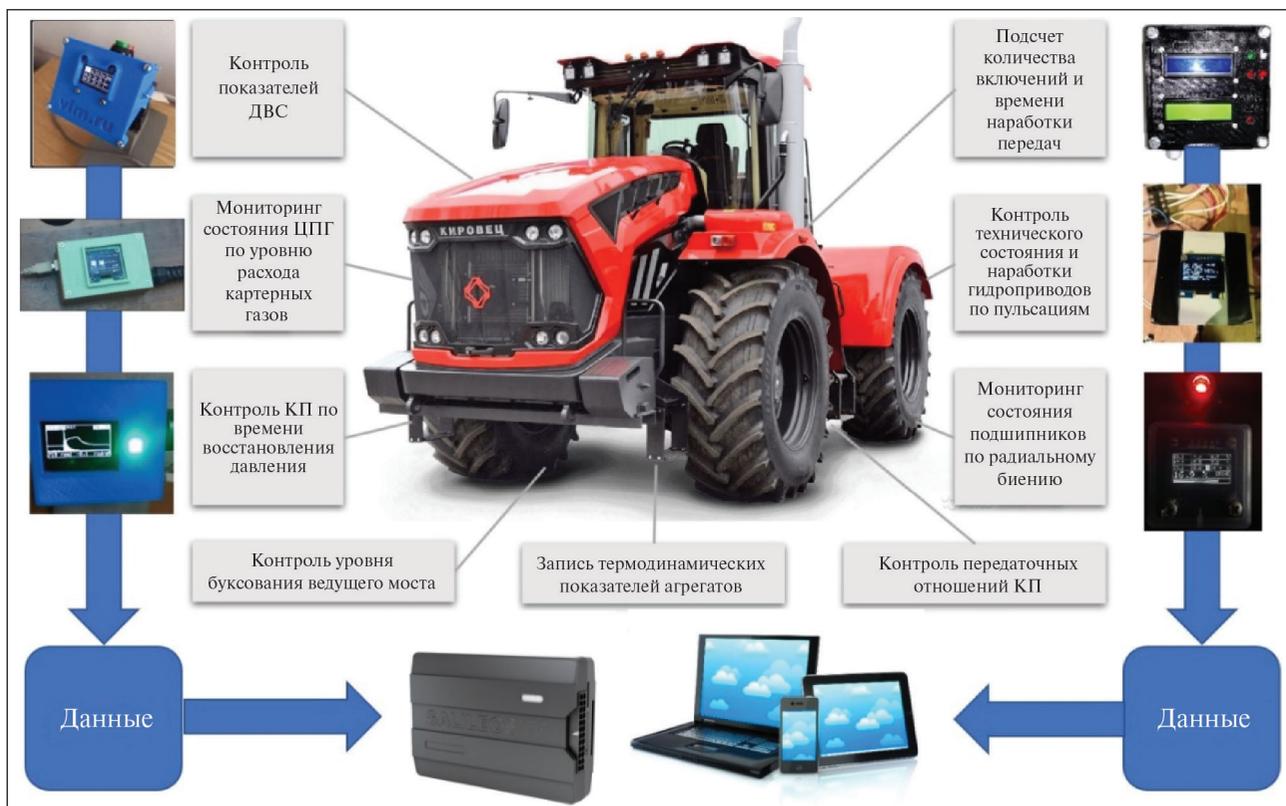


Рис. 1. Интеллектуальный программный комплекс с цифровыми средствами сбора, передачи и анализа диагностических данных технического состояния техники.

счетчики-индикаторы и датчики образуют бортовую информационную сеть, передающую сведения о работе узлов и агрегатов в бортовой компьютер. С использованием НС в бортовом компьютере осуществляется анализ накопленных данных для оценки технического состояния машины и вывод результатов на дисплей оператора. Кроме того, благодаря модулю мобильной связи возможна передача данных в сеть Internet.

**Результаты и обсуждение.** Исходя из необходимости управления техническим состоянием энергонасыщенных тракторов [2], были разработаны способ

и устройство (счетчик-индикатор) для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния механических коробок передач с гидравлической системой управления (рис. 2). Оно состоит из трех модулей и четырех датчиков. По результатам интеллектуального мониторинга с использованием НС оператору в текстовом виде на дисплее выдается характеристика общего технического состояния КП, рекомендации по регулировкам, выбору режимов работ и загрузки трактора, сведения о необходимости проведения сервисного обслуживания трактора, а также на отдельном светодиодном индикаторе аварийный сигнал в случае выхода контролируемых параметров за допустимые предельные значения, проигнорировать который водитель не сможет.

Для реализации разработанного способа безразборного интеллектуального диагностирования коробок перемены передач с гидropоджимными муфтами к узлу контроля давления в КП подключают переходник 5, позволяющий принимать сигнал от штатного датчика КП 6, на переднюю полураму трактора устанавливают модуль 1 с акселерометром, на гидрoлинию, соединяющую фильтр и механизм переключения передач, – накладной датчик температуры 4, в кабине оператора – модуль индикации 2 и модуль интеллектуального диагностирования 3, данные с которого передаются на телематический терминал 7. При переключении передач проводится оценка общего технического состояния КП и неразрывности потока мощности по времени переходного процесса изменения давления ( $T_d$ ) и амплитуде продольных ускорений движения трактора ( $-X_{max} + X_{max}$ ) (рис. 3). При достижении температуры рабочей жидкости в рекомендуемом производителем рабочем диапазоне, пригодном для высоких нагрузок в 65...90 °C [10], которая измеряется накладным датчиком температуры, микроконтроллер автоматически проводит измерение,

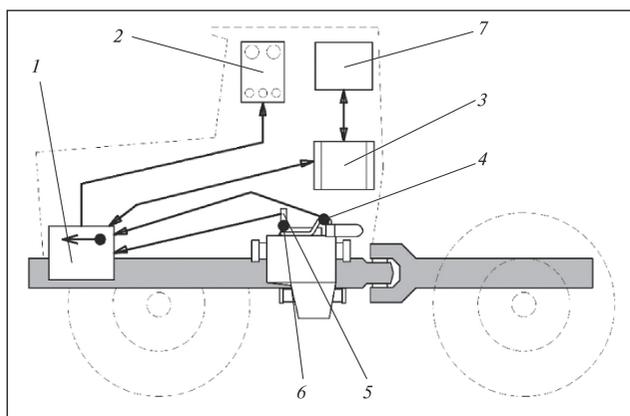


Рис. 2. Схема устройства для интеллектуального мониторинга КП с гидравлической системой управления: 1 – модуль измерений с акселерометром, 2 – модуль индикации, 3 – модуль интеллектуального диагностирования, 4 – накладной датчик температуры, 5 – переходник для подключения к системе контроля давления, 6 – штатный датчик давления, 7 – телематический терминал.

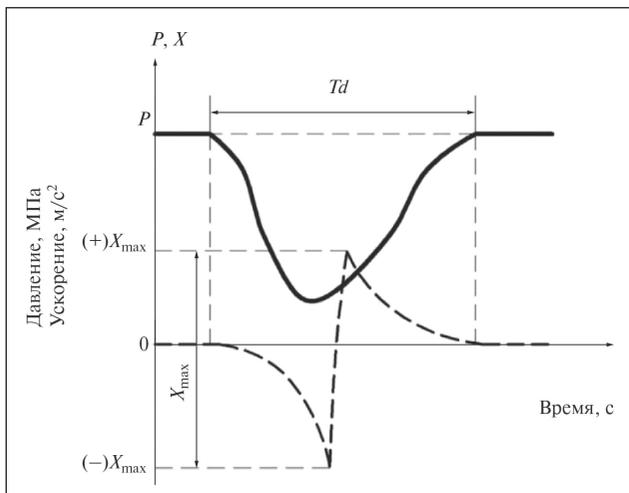


Рис. 3. Переходной процесс изменения давления и ускорения при переключении КП.

вычисление и сравнение полученных данных с установленными диапазонами пороговых значений  $T_d$  в КП: 0,25...0,35 с – номинальное; 0,35...0,45 с – допустимое; 0,45...0,55 с – предельное; менее 0,25 с и более 0,55 с – аварийное состояние. После чего в результате анализа, автоматически проводимого в модуле интеллектуального диагностирования, определяется общее техническое состояние узла.

Разработанные для безразборного интеллектуального диагностирования НС представляют собой отдельные многослойные модели, где на входе используются функциональные диагностические параметры работы агрегата, а на выходе формируется параметр оценки его общего технического состояния. На основе поступающей информации формируется база данных параметров работы КП, которая в дальнейшем преобразуется в значения входного слоя НС.

Оценка общего технического состояния системы гидравлического управления КП проводится по таким показателям, как температура масла ( $T_{oil}$ ), полное время переходного процесса восстановления давления ( $T_d$ ), минимальное давление при переключении передач КП ( $P_{min}$ ), максимальное ускорение замедления трактора ( $-X_{max}$ ), максимальное ускорение разгона ( $+X_{max}$ ), ско-

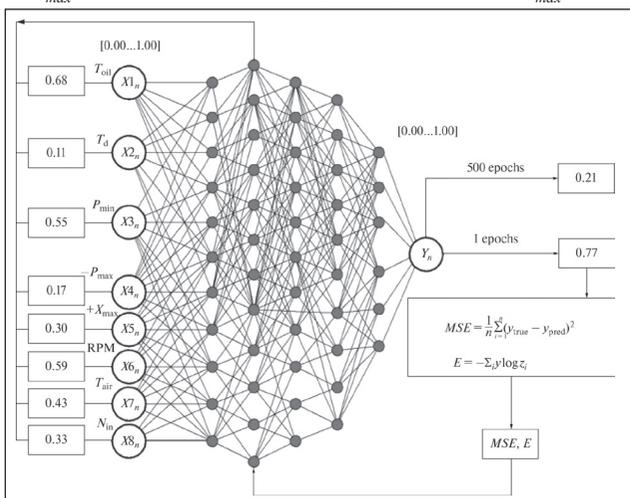


Рис. 4. Алгоритм обучения НС за 500 эпох (epochs) для расчета параметра  $Y_n$ , характеризующего оценку общего технического состояния системы гидравлического управления КП.

рость вращения ведущего вала КП ( $RPM$ ), температура окружающей среды ( $T_{air}$ ), номер включаемой передачи ( $N_{in}$ ), из которых сформирован входной слой нейронов  $X_n$ . Из перечисленных показателей, каждый из которых нормализуется масштабированием в диапазоне от минимального значения как 0 до максимального значения как 1 с точностью до второго знака после запятой, формируются входные сигналы  $X_1-X_8$ , которые подаются на вход виртуальной НС, работающей в модуле интеллектуального диагностирования в тракторе (рис. 4). НС рассчитывает выходное значение искомого параметра  $Y_n$ , которое интерпретируется как параметр технического состояния (номинальное, допустимое, предельное или аварийное), устанавливающий рекомендации для владельца по типу возможных работ и сервисному обслуживанию.

На основе анализа опыта разработки НС [11] с целью повышения точности, уменьшения времени обучения и снижения объема требуемой диагностической информации при разработке программного обеспечения для диагностического модуля были использованы три вида функции активации нейронов НС, позволяющих преобразовывать входные данные технического контроля КП в искомое значение параметра технического состояния  $Y_n$ :

сигмоидальная

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}; \quad (1)$$

гиперболический тангенс

$$f(x) = \tan(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1; \quad (2)$$

ReLU (релу)

$$f(x) = \max(0, x). \quad (3)$$

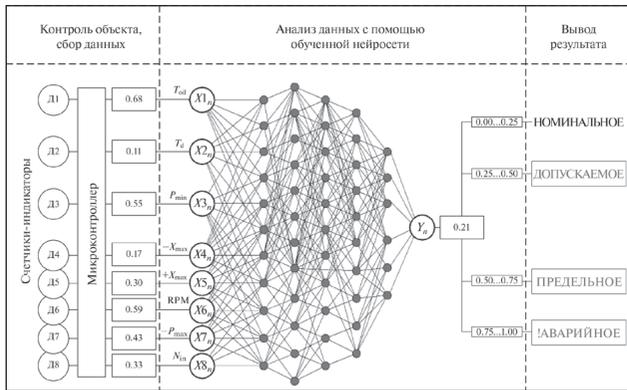
При разработке архитектуры НС, используемой при расчете значения  $Y_n$ , для обучения, корректировки, определения весовых коэффициентов модели НС использованы функции среднеквадратичной ошибки (MSE) и Кросс-энтропии (E) [12]:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{true} - y_{pred})^2, \quad (4)$$

$$E = - \sum_i y \ln z_i. \quad (5)$$

Для КП с гидравлическим управлением установлено, что нормализованные параметры  $X_1-X_4$  минимально необходимы для определения общего технического состояния, а использование нормализованных параметров  $X_5-X_8$  при анализе с помощью НС позволяет оценивать влияние внешних температурных условий и более точно определять рекомендации по дальнейшей эксплуатации для управления техническим состоянием.

Значение  $Y_n$  в диапазоне от 0 до 0,25 соответствует номинальному техническому состоянию КП – допускается эксплуатация трактора без ограничений; от 0,25 до 0,5 – допустимому, при котором рекомендуется эксплуатировать при средней нагрузке; от 0,5 до 0,75 – предельному, при котором допускается эксплуатация только в транспортном режиме и рекомендуется прохождение внепланового ТО, от 0,75 до 1,0 – аварийному, при котором эксплуатация техники не допускается



**Рис. 5. Схема работы устройства для безразборного интеллектуального мониторинга и оценки общего технического состояния системы гидравлического управления КП.**

и необходимо провести ремонт. На основе полученных значений  $Y_n$  и актуализации технического состояния КП выработываются рекомендации по эксплуатации или ремонту (рис. 5).

Кроме того, благодаря непрерывному мониторингу и диагностированию с использованием устройства для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния КП можно, например, своевременно определить следующие аварийные ситуации:

перегрузка или засорение масляного фильтра при температуре масла в КП выше 105 °С (необходимо прекратить эксплуатацию до снижения температуры в рабочий диапазон, проверить масляные фильтры);

падение давления масла в КП при переключении передачи менее 6,0 атм. (признак неисправности гидроаккумулятора, засоренности гидросистемы, износа гидронасоса);

резкое торможение (более 1,7 м/с<sup>2</sup>) и медленный разгон при переключении передачи КП (признак изношенности фрикционных дисков гидроподжимной муфты);

время восстановления давления при переключении передачи более 0,55 с (признак изношенности гидронасоса).

Цифровой мониторинг и интеллектуальная диагностика с использованием датчиков, диагностических устройств, искусственного интеллекта и ИС – один из способов перехода к управлению техническим состоянием машин, узлов и агрегатов, освоения стратегии технического обслуживания и ремонта С<sub>3</sub> путем своевременного определения состояний для обоснования проведения сервисных работ или перераспределения ресурса отдельных узлов и агрегатов техники путем изменения типа работ [13]. При этом анализ получаемых данных о работе техники и минимизация отказов позволяют снизить сверхнормативные расходы с доплатой за срочность на обслуживание и запасные части, а также более эффективно использовать время и имеющиеся ресурсы [14].

Таким образом, при непрерывной работе представленной системы мониторинга и интеллектуальной диагностики появляется возможность оперативно получать информацию о техническом состоянии узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники, корректировать время проведения ТО, исходя из фактического технического состояния. Это позволяет обоснованно проводить необходимые ремонтно-обслуживающие воздействия, что повышает надежность и коэффициент готовности техники, а также уменьшает издержки на обслуживание, по нашим оценкам, до 10 %. При этом становится возможным предупреждение параметрических отказов

техники, связанных с плавным износом или ошибками оператора (до 60 % случаев отказов техники), что будет иметь существенный экономический эффект.

**Выводы.** Для управления техническим состоянием гидромеханической коробки перемены передач трактора «Кировец» и перехода к стратегии С<sub>3</sub> предиктивного технического обслуживания и ремонта разработано информационно-диагностическое средство и программное обеспечение для мониторинга параметров работы, обработки накопленных данных, определения технического состояния с использованием ИИ и ИС. Для реализации разработанного устройства и способа для безразборного интеллектуального диагностирования КП проводится оценка и анализ таких диагностических параметров, как время переходных процессов изменения давления в системе управления при переключении передач, амплитуда продольных ускорений трактора, параметры температуры рабочей жидкости, внешней среды, скорости вращения ведущего вала, номера включаемой передачи, на основе которых нейронная сеть рассчитывает выходное значение параметра  $Y_n$  технического состояния (номинальное, допускаемое, предельное или аварийное), устанавливающего рекомендации владельцу по типу возможных работ и сервисному обслуживанию. Разработанное устройство и программное обеспечение для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния КП с использованием нейронной сети позволяет оперативно определять аварийные режимы в процессе эксплуатации, а также, исходя из фактического технического состояния, проводить предиктивное обслуживание по стратегии С<sub>3</sub> для минимизации отказов и затрат на обслуживание и ремонт.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Литература.

1. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве / Ю. Ф. Лачуга, А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский и др. // *Техника и оборудование для села*. 2022. № 3 (297). С. 2–9. doi: 10.33267/2072-9642-2022-3-2-9.
2. Совершенствование мониторинга системы «Человек-машина-среда» и правил эксплуатации для повышения эксплуатационной надежности тракторов / Н. А. Петрищев, М. Н. Костомахин, А. С. Саятин и др. // *Технический сервис машин*. 2020. № 3 (140). С. 12–20. doi: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-12-20.
3. Ерохин М. Н., Дорохов А. С., Катаев Ю. В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 45–50. doi: 10.26897/2687-1149-2021-2-45-50.
4. Черноиванов В. И., Денисов В. А., Соломашкин А. А. Способ определения остаточного ресурса деталей машин // *Технический сервис машин*. 2020. № 1 (138). С. 50–57. doi: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-50-57.

5. Метод дистанционного контроля функциональных показателей сельскохозяйственной техники / В. Е. Таркивский, Н. В. Трубицын, Е. С. Воронин и др. // *Техника и оборудование для села*. 2018. № 12. С. 22–25.
6. Федоренко В. Ф., Таркивский В. Е. Цифровые беспроводные технологии для оценки показателей сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 1. С. 10–15. doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15.
7. Application of Deep Learning in Fault Diagnosis of Rotating Machinery / W. Jiang, C. Wang, J. Zou, et al. // *Processes*. 2021. Vol. 9. No. 919. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/6/919> (дата обращения: 11.06.2024). doi: 10.3390/pr9060919.
8. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (прогноз) / З. А. Годжаев, В. Г. Шевцов, А. В. Лавров и др. // *Технический сервис машин*. 2019. № 4 (137). С. 220–229.
9. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. № 4. С. 6–10. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
10. Пастухов А. Г., Тимашов Е. П. Диагностирование опорных узлов трансмиссии на основе изучения термонагруженности // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. № 2. С. 61–68. doi: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-61-68.
11. Online monitoring of the technical condition of energy saturated agricultural equipment using neural networks / Y. Kataev, I. Tishaninov, E. Gradov, et al. // *E3S Web of Conferences*. 2023. No. 402. 03026. URL: [https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/39/e3sconf\\_transsiberia2023\\_03026/e3sconf\\_transsiberia2023\\_03026.html](https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/39/e3sconf_transsiberia2023_03026/e3sconf_transsiberia2023_03026.html) (дата обращения: 11.06.2024). doi: 10.1051/e3sconf/202340203026.
12. Shao S., Wang P., Yan R. Generative adversarial networks for data augmentation in machine fault diagnosis. *Computers in Industry*. 2019. No. 106. P. 85–93. doi: 10.1016/j.compind.2019.01.001.
13. Костомахин М. Н. Пестряков Е. В. Программный комплекс для дистанционного контроля узлов и агрегатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 4. С. 19–25. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-19-25.
14. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства / Я. П. Лобачевский, Ю. Ф. Лачуга, А. Ю. Измайлов и др. // *Техника и оборудование для села*. 2023. № 3 (309). С. 2–12. doi: 10.33267/2072-9642-2023-3-2-11.

Поступила в редакцию 12.07.2024  
 После доработки 23.08.2024  
 Принята к публикации 17.09.2024