

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372;62-791.4

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-52-59



Применение цифровых технологий при диагностировании двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники

Катаев Юрий Владимирович , канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

ykataev@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Тишанинов Игорь Александрович, младший научный сотрудник

tishaninov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7858-6561>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Разработка цифровых технологий, позволяющих совершенствовать процесс диагностирования, повышать достоверность определения функциональных характеристик сельскохозяйственной техники в режиме реального времени, является важной и актуальной при техническом сопровождении энергонасыщенных машин. С целью разработки интеллектуальной системы удаленного диагностирования двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники применялся конструктор нейросетей с возможностью использования до 10 входных и выходных параметров. Разработаны алгоритм цифровой системы удаленной диагностики, схема модели прогнозирования отказов при онлайн-мониторинге и цифровая платформа по диагностированию энергонасыщенной сельскохозяйственной техники. Разработанная платформа позволяет получать диагностические параметры ДВС (расход топлива, температуру двигателя и частоту вращения вала двигателя), которые в виде зашифрованных данных удаленно передаются на сервер с помощью GPS-модема и оцифровываются в банке данных, где происходит структурирование и анализ полученных данных при помощи разработанной модели искусственной нейронной сети. Расшифрованные диагностические параметры ДВС направляются оператору, который видит графики параметров технического состояния сельскохозяйственной техники и отчеты по прогнозированию возможных отказов деталей ДВС. Представлен способ сбора и хранения диагностической информации, полученной в результате мониторинга технического состояния сельскохозяйственной техники, и с помощью математической модели нейронной сети проведена обработка этих данных. Применение цифровых технологий при диагностировании техники с помощью искусственного интеллекта позволяет значительно сократить трудоёмкость выполняемых операций, оценить эффективность работы машины в целом и прогнозировать наступление отказов её механизмов, производить своевременное техническое обслуживание и ремонт машин и сократить незапланированные простои энергонасыщенной сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: применение цифровых технологий, конструктор нейросетей, диагностические параметры ДВС, наступление отказов, техническое обслуживание и ремонт машин

Формат цитирования: Катаев Ю.В., Тишанинов И.А. Применение цифровых технологий при диагностировании двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 52-59. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-52-59>.

© Катаев Ю.В., Тишанинов И.А., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Use of digital technologies in diagnosing engines of energy-saturated agricultural machinery

Yuri V. Kataev , CSc (Eng), Associate Professor, Lead Research Engineer

ykataev@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Igor A. Tishaninov, Junior Research Engineer

tishaninov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7858-6561>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The development of digital technologies aimed at improving the diagnostic process, increasing the reliability of determining the functional characteristics of agricultural machinery in real time is important and relevant in the technical support of energy-saturated machines. To develop an intelligent system for remote diagnostics

of the engines of energy-saturated agricultural machinery, the authors tested a neural network constructor with the ability to use up to ten input and output parameters. An algorithm for a digital system for remote diagnostics, a scheme for predicting failures in online monitoring, and a digital platform for diagnosing energy-saturated agricultural machinery have been developed. The developed platform makes it possible to obtain ICE diagnostic parameters (fuel consumption, engine temperature, and engine shaft speed), which are remotely transmitted in the form of encrypted data to the server using a GPS modem and digitized in the data bank. Then the received data are structured and analyzed using the developed artificial neural network models. The decrypted diagnostic parameters of the internal combustion engine are sent to the operator, who sees graphs of the parameters of the technical condition of agricultural machinery and reports on predicting possible failures of internal combustion engine parts. The article presents a method for collecting and storing diagnostic information obtained as a result of monitoring the technical condition of agricultural machinery. These data are processed using a mathematical model of a neural network. The use of digital technologies in diagnosing equipment with the help of artificial intelligence can significantly reduce the complexity of the operations performed, evaluate the efficiency of the machine as a whole and predict the onset of failures of its mechanisms, perform timely maintenance and repair of machines, and reduce unplanned downtime of energy-saturated agricultural machinery.

Keywords: application of digital technologies, neural network designer, ICE diagnostic parameters, failure occurrence, maintenance and repair of machines

For citation: Kataev Yu.V., Tishaninov I.A. Use of digital technologies in diagnosing engines of energy-saturated agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):52-59. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-52-59>.

Введение. Цифровизация процессов диагностирования парка сельскохозяйственной техники (СХТ) с использованием интеллектуальных систем направлена на совершенствование эксплуатационных характеристик и эффективности использования машинно-тракторного парка (МТП) в агропромышленном комплексе.

По статистическим данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, около 40% парка сельскохозяйственной техники содержат в своих конструкциях интеллектуальные решения, в том числе в виде электронных блоков управления как всей машины в целом, так и отдельно по двигателю, трансмиссии и другим агрегатам.

Основными показателями работы двигателя являются мощность, крутящий момент, экономичность и коэффициент полезного действия, контроль которых позволяет характеризовать техническое состояние его систем при эксплуатации.

Разработка инновационного способа удаленного диагностирования, адаптированного к цифровым технологиям, позволит в режиме реального времени получать информацию о работе двигателя (расход топлива, мощность, давление масла, температура, вибрации и т.д.), осуществлять обработку его снимаемых параметров стандартными языками программирования с применением массива обучаемой нейронной сети для прогнозирования технического состояния энергонасыщенной СХТ. Разработка новых инновационных методов и систем на основе цифровых технологий контроля технического состояния техники в целом и ее отдельных агрегатов является актуальной задачей совершенствования инженерной службы АПК.

Использование цифровых технологий при сервисном сопровождении энергонасыщенной сельскохозяйственной техники позволит снизить эксплуатационные и экономические затраты при ее эксплуатации, повысить коэффициент её технической готовности.

Цель исследований: разработка удаленного диагностирования двигателей энергонасыщенной сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий и нейронной сети.

Материалы и методы. Развитие цифровых технологий при диагностировании сельскохозяйственных тракторов и прогнозирование возникновения неисправностей или наступления отказов позволяют поддерживать сельскохозяйственную технику в работоспособном состоянии.

Анализ цифровых методов мониторинга сельскохозяйственной техники проводился на основе изученных материалов дилерских служб по ведущим производителям техники, онлайн-платформ, нормативно-правовых документов по проведению удаленного диагностирования, а также научных трудов в этой области.

В зависимости от характера поставленных задач использовались графический метод исследований, методы математического анализа с применением программного обеспечения, методы системного и статистического анализа с использованием пакетов Python, Microsoft Office Excel 2020 и др.

Созданная цифровая платформа по диагностированию энергонасыщенной сельскохозяйственной техники способна анализировать полученную информацию в онлайн-режиме и обрабатывать её с помощью обучаемой нейронной сети.

Результаты и их обсуждение. В результате онлайн-мониторинга сельскохозяйственной техники с помощью диагностического устройства рассмотрено взаимодействие входного и выходного нейронов в нейронной сети при использовании большого массива данных, полученного при диагностировании. Этот метод позволяет определить причину возникновения неисправностей тракторов и прогнозировать отказы, а также оценить эффективность исследуемого объекта в целом¹ [1-4].

На рисунке 1 представлен алгоритм определения возможного отказа деталей и узлов систем двигателя.

Разработка алгоритма удалённого контроля необходима для последующего внедрения его в виде программы, базирующейся на нейросетевом моделировании, в систему цифрового мониторинга технического состояния сельскохозяйственной техники и прогнозирования отказов. Для этого необходимо сформировать банк данных о технических неисправностях двигателя, составляющих основу системы мониторинга техники по выявлению неисправностей и прогнозирования отказов. Если в процессе контроля эксплуатационные условия работы элементов двигателя тождественны эталонным, то рабочие условия не фиксируются в банке данных. В противном случае учитываются условия, используемые для диагностических параметров (электрические, тепловые, экологические и т.д.), рекомендуемые заводом-изготовителем. Поэтому для получения более достоверного прогнозирования отказа требуется

использование алгоритма машинного обучения в виде нейронной модели, внедрённой в базу данных сервера по показателям неисправностей [5]. ПО Python по обработке данных, получаемых в онлайн-режиме от систем ДВС, с использованием нейронной сети позволяет выявить неисправности и прогнозировать наступление отказов при эксплуатации двигателя, определять его остаточный ресурс по техническому состоянию деталей и узлов его систем.

Вероятность обнаружения неисправностей и наступления отказов в двигателях энергонасыщенной СХТ при эксплуатации можно определять по функции:

$$\lambda_i = f(\lambda'_0, \text{priority}(i)), \quad (1)$$

где λ_0 – интенсивность получения параметров, определяемая как величина, равная 1/10 мин; $\text{priority}(i)$ – приоритет контролируемого (диагностического) i -го параметра.

Мониторинг ДВС, предусматривающий постоянный контроль параметров двигателя, представляет собой систему упорядоченного сбора информации, когда порядок сбора определяется приоритетом. Модуль реагирования оповещает о неисправностях и даёт оценку о техническом состоянии объекта в целом.

Блок-схема по прогнозированию отказов при онлайн-мониторинге представлена на рисунке 2.

Разработанная платформа цифрового диагностирования энергонасыщенной сельскохозяйственной техники, представленная в позиции 1 рисунка 3,

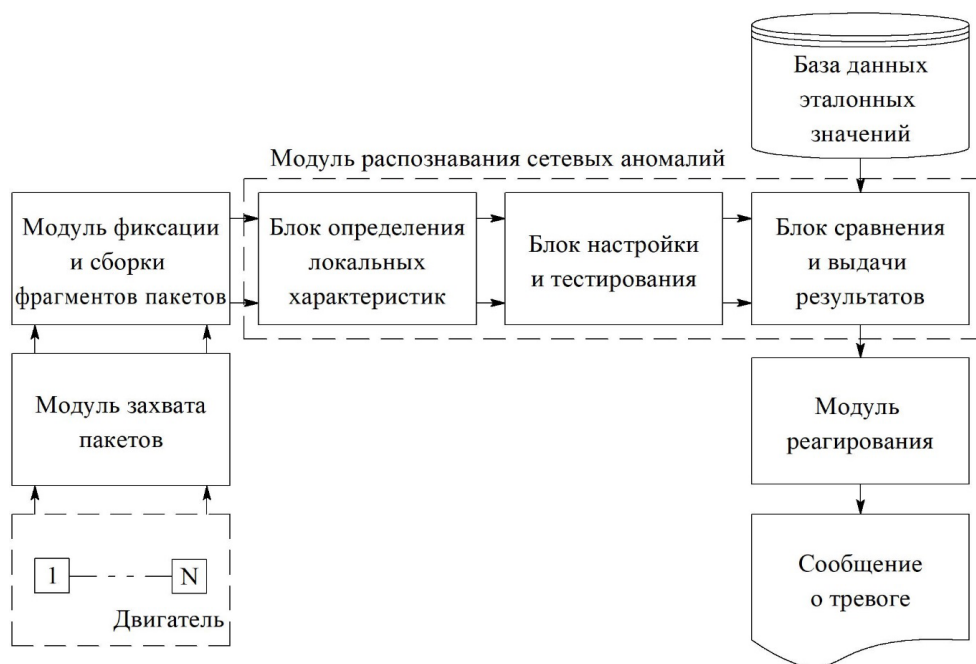


Рис. 1. Алгоритм цифровой системы удалённой диагностики

Fig. 1. Algorithm of the digital remote diagnostic system

¹ Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф. и др. Цифровые решения при техническом сервисе сельскохозяйственной техники: Аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 76 с.

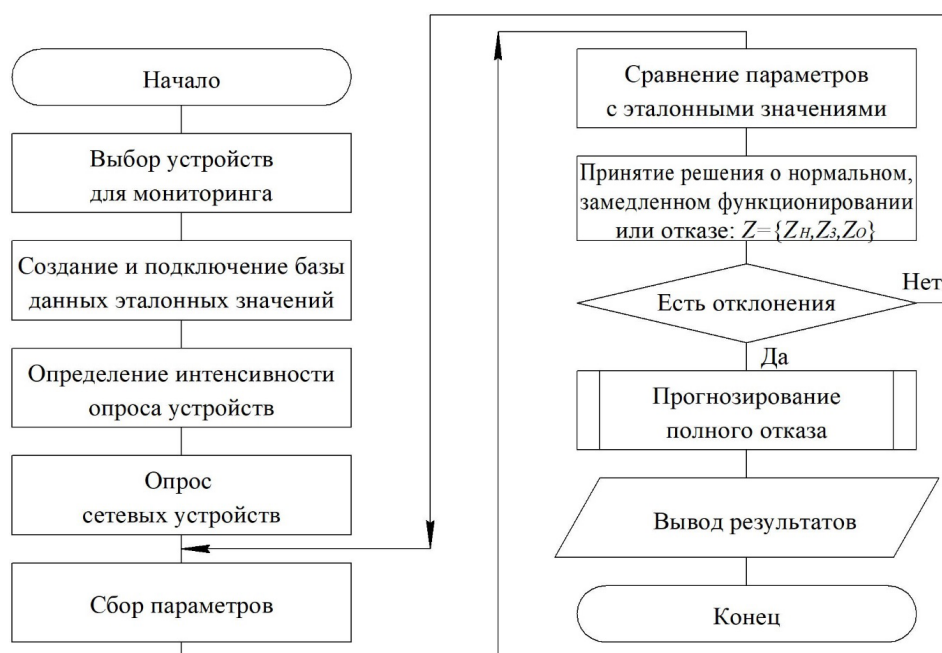


Рис. 2. Блок-схема модели прогнозирования отказов при онлайн-мониторинге

Fig. 2. Block diagram of the online monitoring failure prediction model

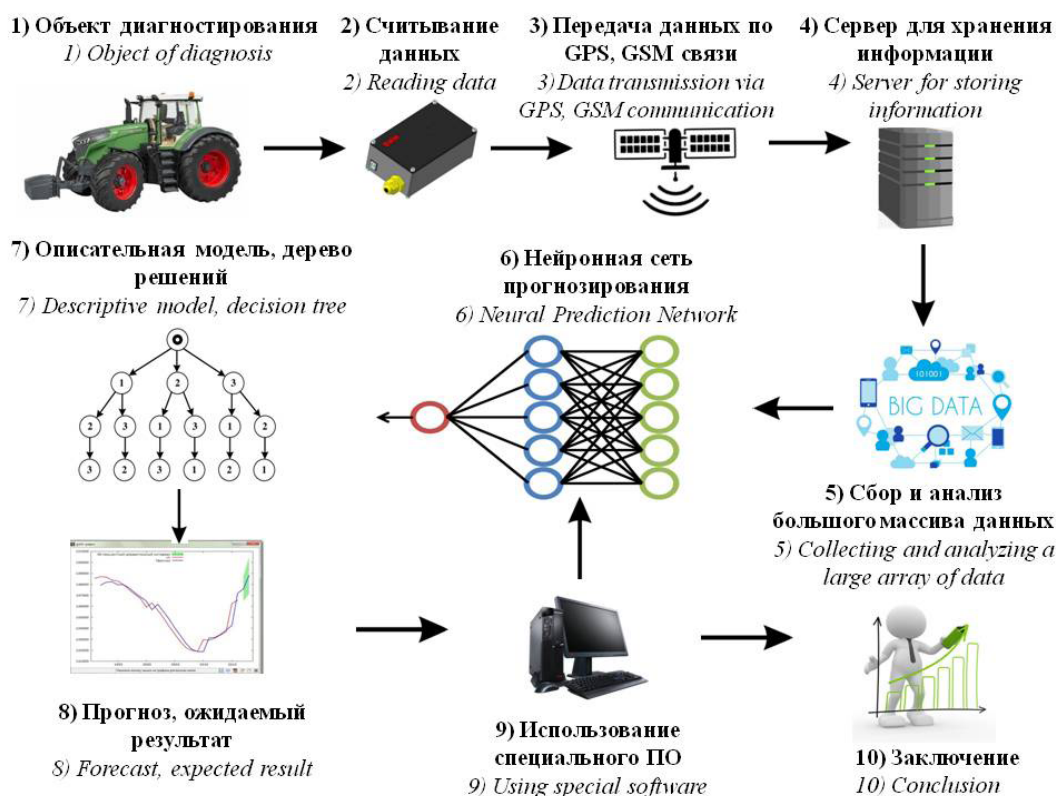


Рис. 3. Цифровая платформа по диагностированию энергонасыщенной сельскохозяйственной техники

Fig. 3. Digital platform for diagnosing energy-saturated agricultural machinery

позволяет использовать специальное устройство для сбора и передачи информации через CAN интерфейс 2, получать данные диагностических параметров ДВС с помощью специального адаптера через OBD-разъем.

Фрагмент получаемой зашифрованной информации представлен на рисунке 4.

Полученная информация в виде зашифрованных данных удаленно с помощью связи GPS/GSM 3 передается на сервер 4 и оцифровывается в банке данных 5, где происходят структурирование и анализ полученных данных при помощи разработанной модели искусственной нейронной сети 6, 7.

1.1.4 Engine Hours, Revolutions: HOURS

F004					
65,253					
1000 ms					
Data Byte 1		Data Byte 2		Data Byte 3	
8	7	6	5	4	3
Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation	Engine total hours of Operation
0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain	0.05 h / Bit gain
0 h offset	0 h offset	0 h offset	0 h offset	0 h offset	0 h offset
SPN 247	SPN 247	SPN 247	SPN 247	SPN 247	SPN 247

Рис. 4. Фрагмент получаемой зашифрованной информации по CAN-протоколу

Fig. 4. Fragment of the received encrypted information via the CAN protocol

Расшифрованные данные направляются с помощью GPS/GSM-связи на персональный компьютер оператора или мобильный телефон^{2,3} [6-9].

Оператор видит информацию в виде структурированных графиков 8 параметров технического состояния энергонасыщенной СХТ, которую при необходимости можно отправить на повторный анализ через нейронную сеть с персонального компьютера с помощью специального программного обеспечения 9, или же можно получить отчеты по прогнозированию 10 возможных отказов деталей ДВС.

Для оптимизации и структурирования диагностической информации, полученной в результате мониторинга, применялся конструктор нейросетей⁴ с возможностью использования до 10 входных и выходных параметров (рис. 5).

Действия многослойной сети (персептрона) представлены в формулах:

$$g_j = f\left(\sum_{i=1}^n v_{ij} x_i + Q_j\right); \quad (2)$$

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^h w_{jk} g_j + T_k\right), \quad (3)$$

где n, h – входные слои; v, w – абсолютные величины случайных значений; Q, T – весовой коэффициент.

Каждая нейронная связь имеет свой вес, определяющий доминанцию определенных нейронов в общем массиве искусственной нейронной сети [10-12].

² Дидманидзе О.Н., Митягин Г.Е., Измайлов А.Ю. и др. Технологические процессы диагностирования и технического обслуживания двигателей транспортных и транспортно-технологических машин. М.: ООО «УМЦ «Триада», 2015. 109 с.

³ Кадури А.А., Николенко С.И., Архангельская Е.В. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018. 480 с.

⁴ Конструктор нейросетей. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/351922/> (дата обращения: 06.03.2023).

В результате получено незначительное изменение весов первых слоев, и поэтому потребовалось значительное количество эпох обучения для обеспечения коррекции веса нейронной связи.

Задачей обучения многослойных нейронных сетей является оптимизация, в связи с чем использовался метод многомерных функций.

С использованием диагностического устройства осуществляются сбор диагностической информации об отказах и неисправностях работы двигателя и формирование базы данных. На этом этапе на основе экспериментальных значений и других достоверных источников информации окончательно формируется банк данных. Этот набор обучающих выборок, описывающих признаки и проявления дефектов, подается на вход нейронной сети. Созданная база данных имеет практическое значение для обучения нейронных сетей при обнаружении ошибок. В такой базе необходимо иметь не менее 3...5 эталонных диагностических параметров, а в оптимальном варианте для полного описания технического состояния диагностируемого объекта – несколько сотен. В экспериментальных исследованиях при различных режимах работы двигателя в качестве контролируемых параметров использовались расход топлива, температура двигателя и частота вращения вала двигателя. Основной причиной этого решения являются технические возможности разработанного устройства по сбору диагностической информации. В настоящее время проводится активная работа по расширению диапазона возможностей устройства с точки зрения увеличения контролируемых параметров. Например, на основании экспериментальных данных, полученных в результате онлайн-мониторинга (табл.), для нейронной сети сформированы две зависимости, характеризующие нормальную работу двигателя при эксплуатации (рис. 6, 7).

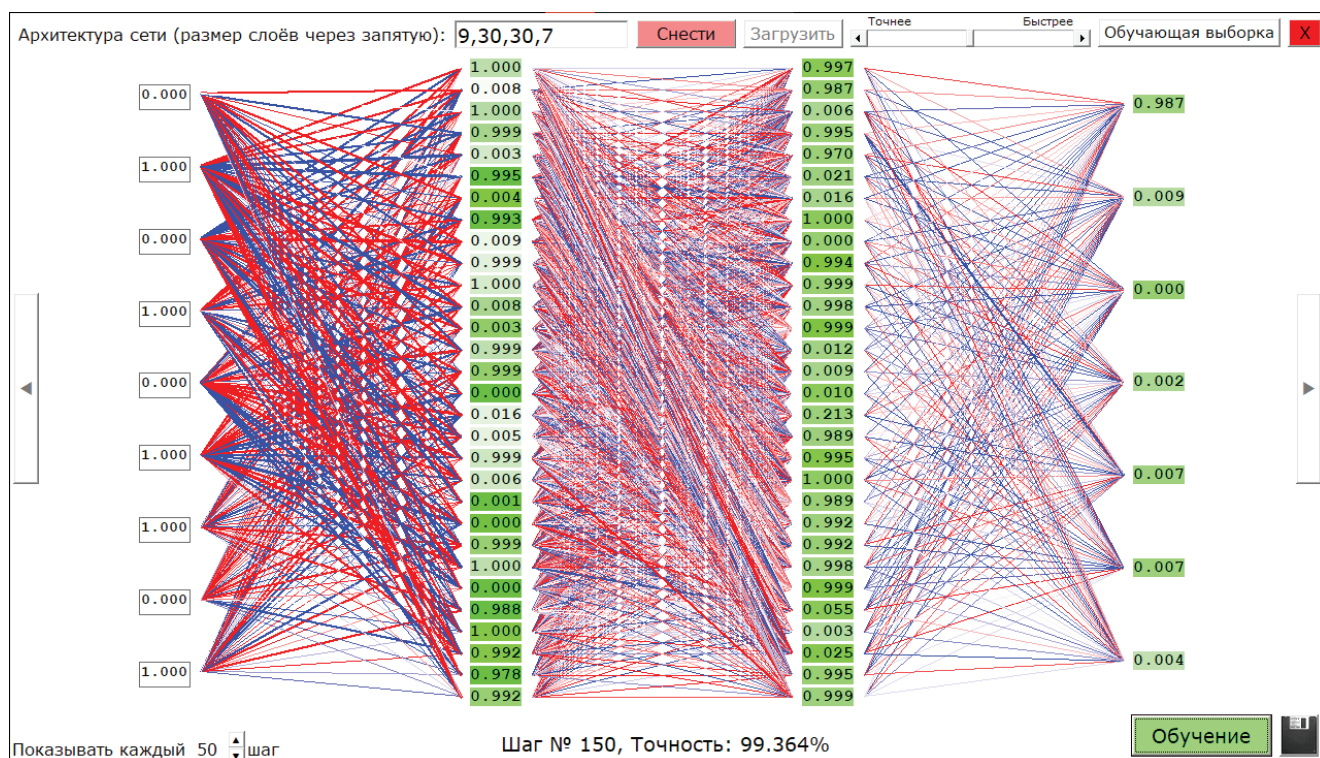


Рис. 5. Общий вид конструктора нейросети
Fig. 5. General view of the neural network constructor

Диагностические параметры ДВС для нейронной сети, полученные в результате онлайн-мониторинга сельскохозяйственной техники

Таблица

ICE diagnostic parameters for a neural network obtained as a result of the online monitoring of agricultural machinery

Table

№ п/п	Расход топлива <i>Fuel consumption level</i>	Температура охлаждающей жидкости <i>Coolant temperature</i>	Частота вращения вала двигателя <i>Engine speed, rpm</i>
1	66,8	76	902,25
2	66,8	76	897,75
3	66,8	76	897,00
4	66,8	76	897,75
5	66,8	76	895,75
6	66,8	76	1675,00
7	68,0	76	1645,00
8	68,0	76	1904,00
9	68,0	76	1952,00
10	66,8	77	1994,50
11	66,8	78	1960,25
12	68,0	79	1987,75
13	68,0	79	2009,50
14	70,0	81	1960,00
15	68,8	82	1933,75
16	70,0	82	1968,25
17	68,8	82	1986,75
18	68,8	81	1980,25
19	68,8	81	2007,00
20	66,8	80	1959,00
21	62,8	80	1980,75
22	62,8	81	1961,25

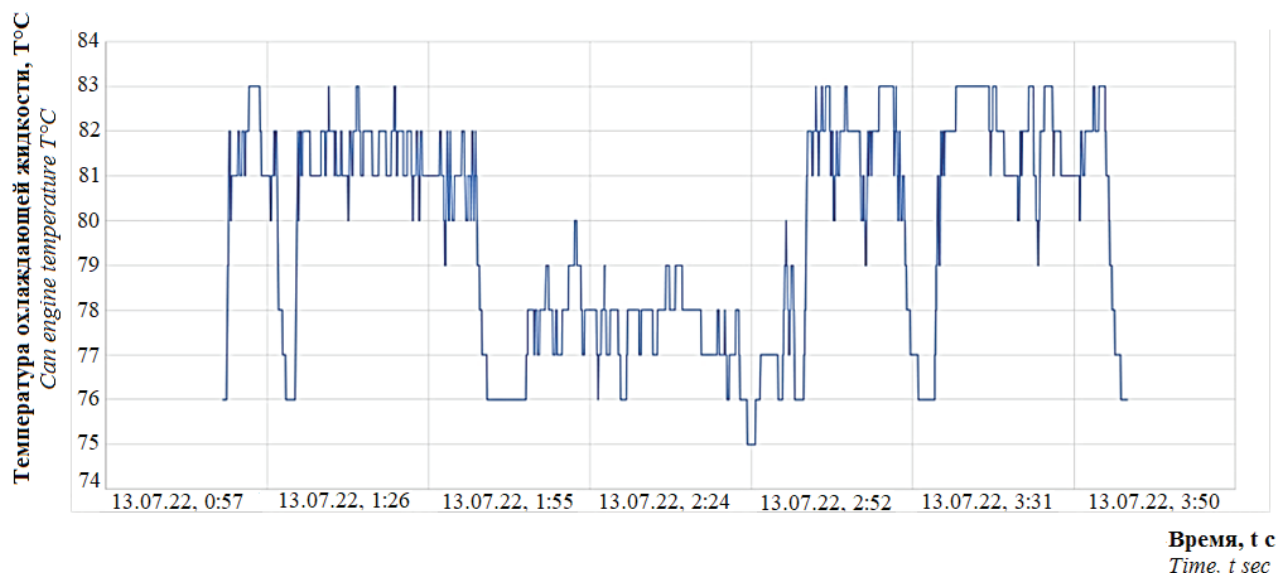


Рис. 6. Температура охлаждающей жидкости двигателя в разрезе 4 ч работы

Fig. 6. Engine temperature monitoring over four 4 hours of operation

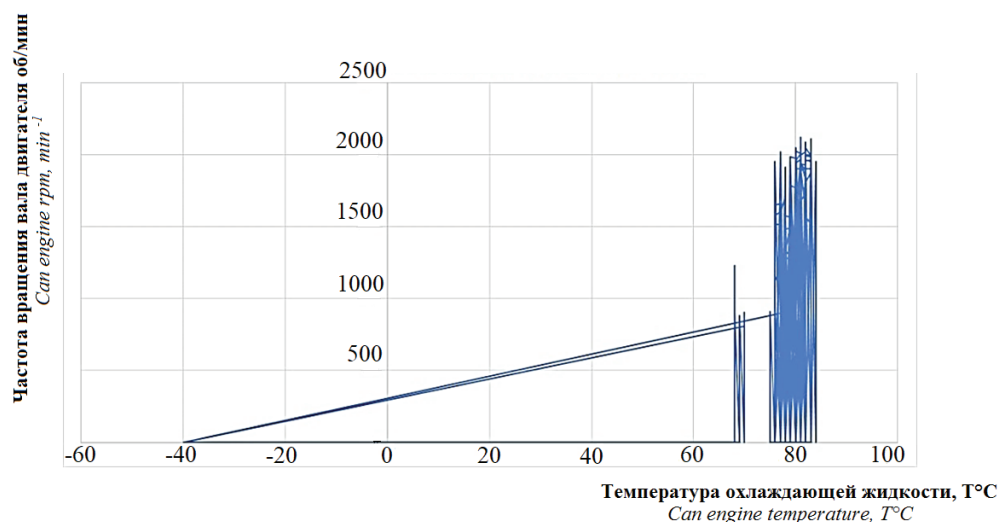


Рис. 7. Значения температуры и частоты вращения коленчатого вала двигателя при онлайн-мониторинге

Fig. 7. Values of the temperature and the engine crankshaft speed during online monitoring

Выводы

Разработанная цифровая платформа с нейросетевым моделированием диагностирования энергонасыщенной сельскохозяйственной техники позволяет

заранее обнаруживать возникшие неисправности и прогнозировать наступление отказов, своевременно на всех уровнях производить техническое обслуживание и ремонт машин.

Список использованных источников

1. Катаев Ю.В., Загоруйко М.Г., Тишанинов И.А., Градов Е.А. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий // Аграрный научный журнал. 2022. № 2. С. 79-82. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp79-82>
2. Петрищев Н.А., Костомахин М.Н., Саяпин А.С., Ивлева И.Б. Совершенствование мониторинга системы «Человек-Машина-Среда» и правил эксплуатации для повышения эксплуатационной надёжности тракторов // Технический сервис машин. 2020. № 3 (140). С. 12-20. EDN: XFGLUF.
3. Интеллектуальный программный комплекс диагностирования и прогнозирования технического состояния

References

1. Kataev Yu.V., Zagoruiiko M.G., Tishaninov I.A., Gradov E.A. Prediction of failures in agricultural machinery engines using digital technologies. *The Agrarian Scientific Journal*. 2022;2:79-82. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp79-82> (In Rus.)
2. Petrishchev N.A., Kostomakhin M.N., Sayapin A.S., Ivleva I.B. Improving the human-machine-environment monitoring system and operation rules for increasing operational tractor reliability. *Machinery Technical Service*. 2020;3(140):12-20. (In Rus.)
3. Dorokhov A.S., Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N. Intelligent software package for diagnosing and predicting the technical condition of agricultural machinery: Certificate of state registration of the computer program RU2021681505; No. 2021668436; 2021. (In Rus.)

сельскохозяйственной техники: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2021681505 / А.С. Дорохов, Ю.В. Катаев, М.Н. Костомыхин [и др.]; № 2021668436; заявл. 19.11.2021; опубл. 23.12.2021. EDN: FDJNZR.

4. Семейкин В.А., Дорохов А.С. Теоретические предпосылки организации процесса входного контроля качества машиностроительной продукции // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2007. № 2 (22). С. 92-94. EDN: VYGHJB.

5. Пестряков Е.В. Программное обеспечение для диагностики и прогнозирования технического состояния сельскохозяйственных машин // Техника и оборудование для села. 2021. № 12 (294). С. 37-41. EDN: NUTMPU.

6. Костомыхин М.Н., Воронов А.Н., Ковалев Л.И., Ковалев И.Л. Контроль параметров надежности сельскохозяйственной техники с использованием систем GPS/ГЛОНАСС // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 26-30. EDN: TODEWR.

7. Манжула В.Г., Федяшов Д.С. Нейронные сети Кохонена и нечёткие нейронные сети в интеллектуальном анализе данных // Фундаментальные исследования. 2011. № 4. С. 108-114. EDN: NDGTWB.

8. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2021. № 2 (102). С. 45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>

9. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Kataev Yu.V., Vergazova Yu.G. Assessing the relative interchangeability in joints with preload. *Russian Engineering Research*. 2020;40(6):469-472. <https://doi.org/10.3103/S1068798X2006009X>

10. Отказоустойчивая нейронная сеть, способ обнаружения отказов нейронной сети, способ обеспечения отказоустойчивости нейронной сети: Патент RU2760636 C2, МПК G06F 11/20, G06N3/02 / Н.В. Суханова, С.А. Шептунов; № 2018145179; заявл. 19.12.2018; опубл. 29.11.2021. EDN: HMNCEQ

11. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка двухслойной нейронной сети для самонастраивающегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // Электротехника. 2013. № 11. С. 10-13. EDN: RERAAL.

12. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the technical condition of agricultural machinery using neural networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022;121:92-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 12.04.2023; принята к публикации 17.04.2023

4. Semeikin V.A., Dorokhov A.S. Theoretical grounds for the organization of the process of input quality control of machine-building products. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2007;2(22):92-94. (In Rus.)

5. Pestryakov E.V. Software for diagnosing and predicting the technical condition of agricultural machines. *Machinery and equipment for rural area*. 2021;12(294):37-41. (In Rus.)

6. Kostomakhin M.N., Voronov A.N., Kovalev L.I., Kovalev I.L. Control of reliability parameters of agricultural machinery using GPS/GLONASS systems. *Trudy GOSNITI*. 2015;118:26-30. (In Rus.)

7. Manzhu V.G., Fedyašov D.S. Kohonen neural networks and fuzzy neural networks in data mining. *Fundamental Research*. 2011;4:108-114. (In Rus.)

8. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering*. 2021;2(102):45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50> (In Rus.)

9. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Kataev Yu.V., Vergazova Yu.G. Assessing the relative interchangeability in joints with preload. *Russian Engineering Research*. 2020;40(6):469-472.

10. Sukhanova N.V., Sheptunov S.A. Fault-tolerant neural network, method for detecting neural network faults, method for ensuring fault tolerance of neural network: Patent RU2760636 C2, IPC G06F 11/20, G06N3/02. No. 2018145179, 2021. (In Rus.)

11. Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. Development of a two-layer neural network for a self-routing analog-to-digital converter based on a neural network. *Elektrotehnika*. 2013;11:10-13. (In Rus.)

12. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022 Vol. 121. P. 92-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9 (In Rus.)

Contribution of the authors

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper and are responsible for plagiarism.

Received 01.03.2023; revised 12.04.2023; accepted 17.04.2023