



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:004.4

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-34-39



Дистанционный контроль частоты вращения коленчатого вала двигателя трактора с использованием алгоритма машинного обучения

Катаев Юрий Владимирович , канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник
ykataev@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Костомахин Михаил Николаевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
redizdat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1126-7520>

Пестряков Ефим Вадимович, младший научный сотрудник
unlimited-007@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>

Петрищев Николай Алексеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
gosniti14@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3608-5408>

Саяпин Александр Сергеевич, младший научный сотрудник
comaconcsas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-780X>

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

Аннотация. Диагностика технического состояния сельскохозяйственной техники на основе машинного обучения, использующего искусственный интеллект, позволяет применять накопленный опыт для локализации неисправности и даёт возможность проводить оценку её технического состояния в максимально короткие сроки. Разработка новых вычислительных устройств (встроенных средств диагностирования) позволяет хранить и обрабатывать большие объёмы информации и сокращать время оценки технического состояния техники. С целью прогнозирования неисправностей проведен анализ частоты вращения коленчатого вала двигателя трактора с использованием алгоритма машинного обучения Random Forest. Разработаны счётчик-индикатор и программное обеспечение для дистанционного контроля частоты вращения коленчатого вала двигателя. Проверка разработанного прототипа счётчика-индикатора программного обеспечения осуществлялась на двигателе Д-243. В результате дистанционное диагностирование сельскохозяйственной техники выявило основные причины неисправностей, влияющие на частоту вращения коленчатого вала двигателя. Алгоритм Random Forest позволил «предсказать» неисправности с допустимой точностью: просчитал все значения правильно из выборки 13 значений и допустил 4 ошибки из выборки 51 значения. Диагностика с помощью алгоритма машинного обучения позволила в режиме реального времени провести оценку технического состояния техники без внесения принципиальных изменений в конструкцию, дать прогнозы и предложения по её обслуживанию и ремонту.

Ключевые слова: дистанционное диагностирование сельскохозяйственной техники, диагностика, техническое состояние, алгоритм машинного обучения, Random Forest, счётчик-индикатор

Формат цитирования: Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Пестряков Е.В., Петрищев Н.А., Саяпин А.С. Дистанционный контроль частоты вращения коленчатого вала двигателя трактора с использованием алгоритма машинного обучения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 5. С. 34-39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-34-39>.

© Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Пестряков Е.В., Петрищев Н.А., Саяпин А.С., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Remote control of the crankshaft speed of a tractor engine using a machine learning algorithm

Yuriy V. Kataev , CSc (Eng), Associate Professor, Lead Research Engineer
ykataev@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

Mikhail N. Kostomakhin, CSc (Eng), Lead Research Engineer
redizdat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1126-7520>

Efim V. Pestryakov, Junior Research Engineer
unlimited-007@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>

Nikolay A. Petrishev, CSc (Eng), Lead Research Engineer

gosniti14@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3608-5408>

Aleksandr S. Sayapin, Junior Research Engineer

comaconcrsas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-780X>

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

Abstract. Diagnostics of the technical condition of agricultural machinery based on machine learning with artificial intelligence employs the accumulated experience to localize the malfunction and makes it possible to evaluate its technical condition in the shortest possible time. New computing devices (built-in diagnostic tools) store and process large amounts of information and reduce the time needed to assess the technical condition of the equipment. To predict malfunctions, the authors analyzed the crankshaft speed of a tractor engine using the Random Forest machine learning algorithm. They developed a counter-indicator and software for the remote control of the engine crankshaft speed. The developed prototype counter-indicator software was tested on the D-243 engine. As a result, remote diagnostics of agricultural machinery revealed the main causes of malfunctions affecting the engine crankshaft speed. The Random Forest algorithm made it possible to “predict” malfunctions with acceptable accuracy: it calculated all values correctly from a sample of 13 values and made 4 errors from a sample of 51 values. Diagnostics with the help of a machine learning algorithm made it possible to assess the technical condition of the equipment in real time without making fundamental changes to the design, and to give forecasts and suggestions for its maintenance and repair.

Keywords: remote diagnostics of agricultural machinery, diagnostics, technical condition, machine learning algorithm, Random Forest, counter-indicator

For citation: Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Pestryakov E.V., Petrishchev N.A., Sayapin A.S. Remote control of the crankshaft speed of a tractor engine using a machine learning algorithm. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(5):34-39. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-34-39>.

Введение. Важными направлениями научно-технологического развития в Российской Федерации на ближайшие 10-15 лет являются разработка современных цифровых, интеллектуальных, производственных технологий, роботизированных систем, программных комплексов, применение новых материалов и способов конструирования, создание систем обработки больших объёмов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта¹.

Применение в сельском хозяйстве современных цифровых интеллектуальных технологий, роботизированных систем и программных комплексов позволит управлять технологическими процессами и осуществлять мониторинг текущего состояния сельскохозяйственной техники. При этом важным является правильный и бесперебойный сбор данных с технического средства. Огромный массив данных требует качественного и быстрого анализа [1-3]. Для достижения этих целей существуют технологии: такие, как BigData и алгоритмы машинного обучения.

Внедрение современных цифровых средств измерения и вычисления контролируемых параметров состояния двигателя повышает достоверность измерений и существенно снижает риски использования

деталей и узлов в предельном техническом состоянии. Технологии машинного обучения в данном случае позволяют оперативно выявлять неисправности [4-6].

Отсутствие разработок специализированных технических средств, направленных на дистанционное диагностирование сельскохозяйственной техники, обрабатывающих данные в режиме реального времени с использованием алгоритмов машинного обучения, в частности, алгоритма Random Forest, позволяет говорить о новизне идеи и об актуальности данного направления. Применение этого алгоритма и прототипа счётчика-индикатора позволит контролировать частоту вращения коленчатого вала двигателя и осуществлять сбор первичных данных технического состояния двигателя, в цифровом виде оценивать изменение работы двигателя во время его эксплуатации, прогнозировать ряд неисправностей и передавать параметры на сервер для накопления BigData.

Цель исследований: разработка новых вычислительных устройств для контроля и анализа частоты вращения коленчатого вала двигателя с дальнейшим прогнозированием неисправностей с помощью алгоритмов машинного обучения.

Материалы и методы. Для контроля частоты вращения коленчатого вала двигателя трактора разработан прототип счётчика-индикатора.

Разработанный прототип счётчика-индикатора состоит из терминала или одноплатного компьютера с операционной системой на базе дистрибутива Linux,

¹ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации: утв. Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71451998> (дата обращения: 12.03.2023).

где происходят основная обработка информации и отображение ее на дисплее или передача на сервер. Arduino UNO совместно с инфракрасным датчиком положения позволяет считывать и вычислять частоту вращения коленчатого вала двигателя за 1 мин.

Для передачи информации выбран интерфейс RS-485. За его реализацию отвечает TTL-преобразователь, который при необходимости передаёт информацию с Arduino на терминал и персональный компьютер [5-7]. На терминале также установлено программное обеспечение, которое с помощью алгоритма машинного обучения Random Forest сохраняет и анализирует получаемые данные. Анализ позволяет прогнозировать и выявлять неисправности в режиме реального времени. Выбран язык программирования Python, использующий технологию построения нейронных сетей cuDNN от компании Nvidia. Это заметно ускоряет вычисления, связанные с машинным обучением. Все устройство способно работать от бортовой сети трактора [8, 9].

Схема соединений модулей устройства представлена на рисунке 1.

Количество оборотов двигателя рассчитывается по формуле:

$$RPM = 60 / \left(\frac{t - t_0}{1000000} \right),$$

где RPM – количество оборотов в 1 мин; t – текущее время работы программы, микросекунды (мкс); t₀ – время последнего оборота, мкс.

Временные показатели поступают из системных функций микроконтроллера Arduino UNO. На нём же

сразу рассчитывается количество оборотов в 1 мин, что позволяет снять часть нагрузки с терминала. На терминал поступает уже готовая информация [10].

Анализ контролируемых параметров осуществляется с помощью разработанного программного обеспечения, использующего алгоритм машинного обучения Random Forest.

Результаты и их обсуждение. Разработанное программное обеспечение реализуется по следующему принципу. Сначала через интерфейс RS-485 проводится сбор и накопление информации в базе данных. Если контрольно-диагностических параметров несколько и необходимо масштабирование данных, то задается диапазон их значений. Далее для обучения дерева принятия решений из этих данных на языке программирования Python создается программная модель и импортируются две специальные библиотеки: Pandas (обработка и анализ данных) и NumPy (реализация вычислительных алгоритмов для быстрой работы с многомерными массивами). На основе полученного массива строится дерево принятия решений – алгоритм контролируемого машинного обучения. Для каждого параметра в наборе данных алгоритм дерева решений формирует узел, в котором наиболее важный параметр помещается в корневой узел. С корневого узла обучение продвигается вниз по дереву, следуя за соответствующим узлом, который подходит нашему условию. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнут конечный узел, содержащий прогноз или результат дерева решений². Структура дерева принятия решений представлена на рисунке 2 [11].

Достоинствами данного метода являются: способность эффективно обрабатывать большой массив данных как непрерывных, так и дискретных признаков; самостоятельная оценка способности модели к обобщению; возможность масштабирования и параллельных вычислений.

Недостатком данного метода является потребность в больших вычислительных мощностях. Необходим как минимум одноплатный компьютер не ниже 4 поколения с многоядерным процессором, с поддержкой многопоточности и большой оперативной

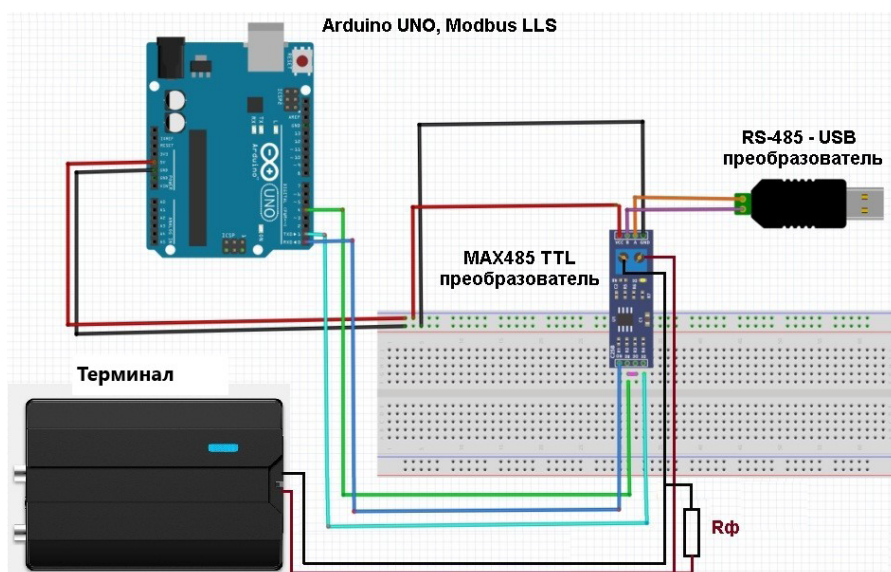


Рис. 1. Схема прототипа счётчика-индикатора для дистанционного контроля частоты вращения коленчатого вала двигателя

Fig. 1. Scheme of the prototype counter-indicator for the remote control of the engine crankshaft speed

² Гриффитс Д., Гриффитс Д. Изучаем программирование на C+. М.: Эксмо, 2019. 624 с.

памятью, а также с отдельным графическим модулем³ [12-13].

Проверка разработанного прототипа счётчика-индикатора программного обеспечения осуществлялась на двигателе Д-243. Была доказана возможность использования счётчика-индикатора для сбора исходной информации и применения её в дальнейшем для оценки технического состояния двигателя в процессе эксплуатации.

Диагностика выявила основные причины неисправностей, влияющие на частоту вращения коленчатого вала двигателя (табл.).

Отметим, что причины и вероятность их возникновения со временем могут измениться.

При выполнении алгоритма Random Forest получены два результата: «Error on test set 0.0» означает, что из тестовой выборки (13 значений) алгоритм прочитал все значения правильно; «Error on full set 4.0» означает, что алгоритм допустил 4 ошибки из всей выборки (51 значение). Два этих поля отображают точность, с какой Random Forest «предсказывает» неисправности. Последняя строка программы отображает массив из последних элементов, которые являются результатами расчёта (в данном случае – 5). Также в программе предусмотрена возможность ввода диапазона исследуемых значений – например, последние несколько тысяч масштабируемых значений оборотов двигателя, и если результат будет приводить к высокой вероятности неисправности, программа отразит ее.

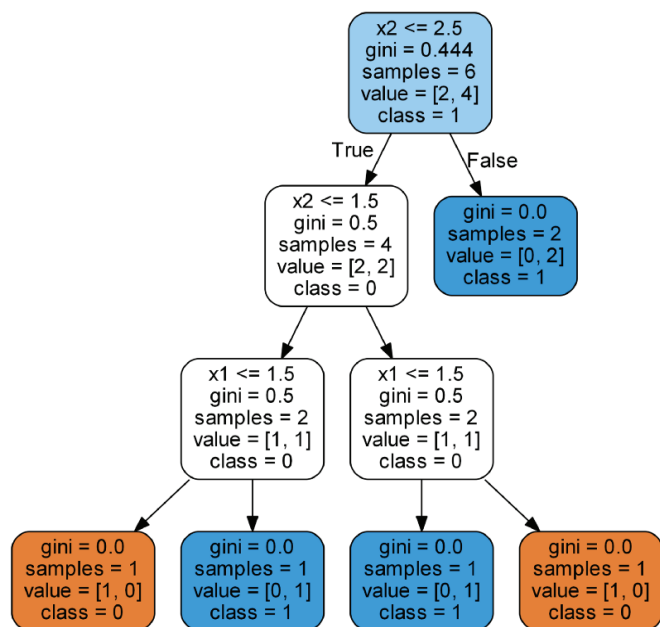


Рис. 2. Структура дерева принятия решений

Fig. 2. Decision tree structure

³ Сандерс Д., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах. Введение в программирование графических процессоров: пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2013. 232 с.

В процессе эксплуатации алгоритм машинного обучения будет переобучаться на новые показатели исходя из накопленного массива данных. Данная таблица хранится как в локальной базе данных (на терминале), так и на сервере. Для удобства создана база формата NoSQL, оперирующая JSON-файлами. Но использовать можно любую систему управления базами данных, так как на принципе и качестве работы программного обеспечения это никак не скажется⁴ [14-15].

Программа не только анализирует частоту вращения коленчатого вала, но и отслеживает динамику её изменения с учётом накопленной базы данных. При этом сохраняется история данной динамики, что позволяет выявить корреляцию изменений, происходящих со временем. Также предусмотрены временные отметки, хранящиеся в базе данных, с помощью которых можно отслеживать время (когда именно какой-либо параметр выходит за предельное состояние).

Таблица
Причины неисправностей, влияющие на увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя

Causes of malfunctions that affect the increase in the engine crankshaft speed

Причины Causes	Вероятность, % Probability, %
Заедание тросика педали акселератора <i>Dragging of the accelerator pedal</i>	90
Износ потенциометров (реостатов, переменных резисторов) в датчике педали акселератора <i>Wear of potentiometers (rheostats, variable resistors) in the accelerator pedal sensor</i>	80
Засорение воздушного фильтра <i>Clogged air filter</i>	70
Неисправность регулятора холостого хода <i>Malfunction of the idle regulator</i>	60
Износ форсунок / Exhaust nozzle	50
Растяжение ремня ГРМ (цепи) <i>Timing belt (chain) tension</i>	40
Заедание электрического привода дроссельной заслонки <i>Failure of the electric actuator of the throttle valve</i>	30
Выход из строя датчика температуры <i>Temperature sensor failure</i>	20
Неправильная работа электронного блока управления <i>Incorrect operation of the electronic control unit</i>	10

⁴ Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. М.: ДМК Пресс, 2019. 232 с.; Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение: пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.

Это дает возможность оценивать техническое состояние машины и правильно ее эксплуатировать.

При введении аналогично анализа других технических параметров появляется возможность получать в режиме реального времени информацию о техническом состоянии трактора и производить его плановое техническое обслуживание. Для этого и в программное обеспечение, и в само устройство заложена возможность быстрого модульного расширения спектра анализируемых параметров: достаточно подключить новый поток данных к CAN-шине или интерфейсу RS-485 и задать программе таблицу значений для обучения поиска новых неисправностей. Программное

обеспечение запускается на терминале разработанного устройства, что намного упрощает все монтажные работы на трактор. Благодаря этому данная разработка станет более гибкой и универсальной в её реализации.

Выводы

Разработанные счётчик-индикатор и алгоритм машинного обучения позволяют проводить дистанционное диагностирование сельскохозяйственной техники без внесения принципиальных изменений в конструкцию, отслеживать и прогнозировать целый ряд возможных неисправностей сельскохозяйственной техники до момента серьёзных поломок.

Список использованных источников

1. Дорохов А.С. Совершенствование входного контроля качества сельскохозяйственной техники на дилерских предприятиях // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2009. № 2 (33). С. 73-75. EDN: JWSYPN.
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 надежности тракторов // Технический сервис машин. 2020. № 3 (140). С. 12-20. EDN: XFGLUF.
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. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
4. Дидманидзе О.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Тенденции развития цифровых технологий диагностирования технического состояния тракторов // Техника и оборудование для села. 2020. № 11 (281). С. 39-43. EDN: SUTTJS.
5. Саяпин А.С. Экспериментальный счётчик-индикатор для оценки технического состояния насоса гидропривода по амплитудно-фазовому методу // Технический сервис машин. 2021. № 4 (145). С. 76-85. EDN: XZCQTE.
6. Измайлов А.Ю. Синтез автоматизированных информационных технологий и микропроцессорных систем // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2007. № 5. С. 91-92. EDN: IBQGUX.
7. Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Саяпин А.С., Молибоженко К.К. Повышение уровня технического обслуживания энергонасыщенной техники // Техника и оборудование для села. 2022. № 4 (298). С. 27-31. EDN: BMPALW.
8. Pstryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics III. CSDEIS2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Vol. 121. Pp. 92-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9
9. Петрищев Н.А., Костомахин М.Н., Саяпин А.С., Макаркин И.М., Пестряков Е.В., Молибоженко К.К. Оперативная оценка предельного состояния узлов и агрегатов тракторов с применением счетчиков индикаторов // Технический сервис машин. 2021. Т. 59, № 3 (144). С. 12-21. EDN: YCZPHJ.
10. Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Обоснование параметров полётного задания беспилотного воздушного судна для мультиспектральной аэрофотосъемки // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 3. С. 33-39. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-33-39>

References

1. Dorokhov A.S. Perfection of entrance quality assurance of agricultural machinery at the dealer enterprises. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2009;2:73-75. (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. 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. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
4. Didmanidze O.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Trends in the development of digital technologies for diagnosing the technical condition of tractors. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;11(281):39-43. (In Rus.)
5. Sayapin A.S. Experimental indicator counter for estimating the technical state of a hydraulic drive pump by amplitude-phase method. *Machinery Technical Service*. 2021;4(145):76-85. (In Rus.)
6. Izmaylov A. Yu. Synthesis of automated information technologies and microprocessor systems for production processes. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2007;5:91-92. (In Rus.)
7. Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Sayapin A.S., Molibozhenko K.K. Increasing the level of maintenance of energy-saturated equipment. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;4(298):27-31. (In Rus.)
8. Pstryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics III. CSDEIS2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022, Vol 121. Pp. 92-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9
9. Petrishchev N.A., Kostomakhin M.N., Sayapin A.S., Makarkin I.M., Pstryakov E.V., Molibozhenko K.K. Operational assessment of the limit state of tractor units with the use of indicator counters. *Machinery Technical Service*. 2021;59(3):12-21. (In Rus.)
10. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Justifying the parameters for unmanned aircraft flight missions of multispectral aerial photography. *Agricultural Machines and Technologies*. 2022;16(3):33-39. (In Rus.)
11. Makarkin I.M., Dunaev A.V., Galimov T.M. Some methods of diagnosing the reduction gears of driving axles of promising KamAZ vehicles. *Automotive Industry*. 2016;6:27-30. (In Rus.)
12. Karande A.M., Kalbande D.R. Weight assignment algorithms for designing fully connected neural network. *International*

11. Макаркин И.М., Дунаев А.В., Галимов Т.М. Приёмы диагностирования редукторов ведущих мостов перспективных автомобилей КамАЗ // Автомобильная промышленность. 2016. № 6. С. 27-30. EDN: WJKLBV.

12. Karande A.M., Kalbande D.R. Weight assignment algorithms for designing fully connected neural network. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018;10(6):68-76. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.08>

13. Dharmajee Rao D.T.V., Ramana K.V. Winograd's Inequality: Effectiveness for Efficient Training of Deep Neural Networks // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018. № 10 (6):49-58. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.06>

14. Jiang W., Wang Ch., Zou J., Zhang Sh. Application of Deep Learning in Fault Diagnosis of Rotating Machinery // *Processes*. 2021;9(6):919. <https://doi.org/10.3390/pr9060919>

15. Нгуен М.Т. Диагностика автомобильного двигателя на основе нейронной сети // Молодой ученый. 2019. № 26 (264). С. 76-81. EDN: TDDFUD.

Вклад авторов

Ю.В. Катаев – формулирование основной концепции исследования
М.Н. Костомакхин – разработка методологии исследования

Е.В. Пестряков – табличное и графическое представление результатов, описание результатов

Н.А. Петрищев – подготовка начального варианта текста, формирование выводов, анализ литературы

А.С. Саяпин – описание результатов, анализ литературы

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 16.03.2023, после рецензирования 27.03.2023, принята к публикации 22.08.2023

Journal of Intelligent Systems and Applications. 2018;10(6):68-76. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.08>

13. Dharmajee Rao D.T.V., Ramana K.V. Winograd's Inequality: Effectiveness for Efficient Training of Deep Neural Networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018;10(6):49-58. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.06>

14. Jiang W., Wang Ch., Zou J., Zhang Sh. Application of Deep Learning in Fault Diagnosis of Rotating Machinery. *Processes*. 2021;9(6):919. <https://doi.org/10.3390/pr9060919>

15. Nguyen M.T. Diagnostics of an automobile engine based on a neural network. *Molodoy ucheniy*. 2019;26(264):76-81. (In Rus.)

Contribution of the authors

Yu.V. Kataev – conceptualization

M.N. Kostomakhin – research methodology

E.V. Pestyakov – tabular and graphical visualization of the results, description of the results

N.A. Petrishchev – original draft preparation, drawing conclusions, literature review

A.S. Sayapin – description of the results, literature review

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 16.03.2023; revised 27.03.2023; accepted 22.08.2023