

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.34-42.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.34-42.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2024-34-42

Создание и развитие высоконадежных информационно-управляющих систем с элементами искусственного интеллекта для перспективных технологических комплексов

Борис Максович Бржозовский¹, д.т.н.

Владимир Васильевич Мартынов², д.т.н.

Марина Борисовна Бровкова³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия

¹ bmb sar85@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8486-4467>

² v_martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

³ bmb sar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1863-0709>

Аннотация. Представлены методы и средства улучшения сложного технологического оборудования за счет оперативного оценивания качества реализуемых технологий в реальном времени. Это связано с тем, что при реализации технологических операций на универсальном оборудовании каждый раз возникает необходимость моделирования динамических процессов и оценивания большого числа факторов неопределённости, оказывающих влияние на качество формообразования. Априорно учитывать эти факторы не представляется возможным. Возникает необходимость создания новых информационных технологий с возможностями универсального применения при оперативном оценивании различных динамических процессов в системах диагностики, идентификации и управления. Реализованы типовые компьютерные системы статистического оценивания и оптимизации динамических процессов с возможностями универсального применения для различных реализаций современных технологий. Показана возможность применять интегративные критерии и методы искусственного интеллекта для систем диагностики, идентификации и управления перспективными технологическими комплексами. Представлена реализация информационных систем при управлении сложными объектами различного технологического назначения. Предложенные методы и подходы моделирования апробированы на различных предприятиях машиностроения при обработке деталей на токарных, токарно-фрезерных и шлифовальных станках как универсальных, так и с ЧПУ. Результаты исследований позволили обосновать новые принципы автоматизированного контроля и оптимальной настройки технологических процессов в реальном времени и создать автоматизированную систему оценки их качества, позволяющую повысить оперативность и достоверность принимаемых управляющих решений за счет проведения оптимизации непосредственно на действующем оборудовании. На основе изложенных выше методов и подходов получены новые результаты при реализации плазменных технологий модификации геометрически сложных поверхностей изделий машиностроения, направленных на повышение износостойкости, твердости и других технических характеристик рабочих поверхностей изделий прецизионного машиностроения. Достаточно полная апробация методов, подходов, процедур и критериев принятия решений для различных технологий позволяет их рекомендовать для универсального применения.

Ключевые слова: оперативное оценивание, управление, интегративные критерии, плазменные технологии, методы искусственного интеллекта

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту РНФ № 19-19-00101 и по проекту РНФ № № 20-19-00299.

Для цитирования: Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б. Создание и развитие высоконадежных информационно-управляющих систем с элементами искусственного интеллекта для перспективных технологических комплексов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 34–42. doi: 10.30987/2223-4608-2024-34-42

Creation and development of highly reliable information and control systems with elements of artificial intelligence for advanced technological complexes

Boris M. Brzhozovsky¹, D. Eng.

Vladimir V. Martynov², D. Eng.

Marina B. Brovkova³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ bmbars85@mail.ru

² v_martynov@mail.ru

³ bmbars@mail.ru

Abstract. Methods and means of improving complex technological equipment are shown through the operational assessment of the quality of implemented technologies realtime. This is proved by the fact that implementing technological operations on universal equipment each time requires modeling dynamic processes and taking into account a large number of uncertainty factors that affect the geometry generation quality. It is not possible to be a priori aware of these factors. There is a need to create new information technologies with the possibilities of universal application for immediate understanding of various dynamic processes in diagnostic, identification and control systems. Standard computer systems for statistical analysis and optimization of dynamic processes with the possibilities of universal application for various implementations of modern technologies have been introduced. The possibility of using integrative criteria and methods of artificial intelligence for diagnostic systems, identification and control of advanced technological complexes is shown. The implementation of information systems for the management of complex objects of various technological purposes is presented. The proposed modeling methods and approaches have been tested at various machine-building enterprises when processing parts on turning, milling and grinding machines, both universal and CNC. The research results made it possible to implement new principles of automated control and optimal adjustment of technological processes in real time and create an automated system for evaluating their quality, which allows increasing the efficiency and reliability of management decisions by conducting optimization directly on operating equipment. Based on the methods and approaches described above, new results have been obtained in the implementation of plasma technologies for the modification of geometrically complex surfaces of mechanical engineering products aimed at increasing wear resistance, hardness and other technical characteristics of the working surfaces of precision engineering products. A fairly complete approbation of methods, approaches, procedures and decision-making criteria for various technologies allows them to be recommended for universal applicability.

Keywords: operational assessment, management, integrative criteria, plasma technologies, artificial intelligence methods

Acknowledgements: the material was prepared as part of RHSF project No. 19-19-00 scientific research and RHSF project No. 20-19-00299 scientific research.

For citation: Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Brovkova M.B. Creation and development of highly reliable information and control systems with elements of artificial intelligence for advanced technological complexes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 34–42. doi: 10.30987/2223-4608-2024-34-42

Введение

Сложность и разнообразие современного технологического оборудования определяют необходимость создания новых информационных технологий с возможностями универсального применения при оперативном оценивании различных динамических процессов в

системах диагностики, идентификации и управления. Это связано тем, что при реализации технологических операций на универсальном оборудовании каждый раз возникает необходимость моделирования динамических процессов и оценивания большого числа факторов неопределённости, оказывающих влияние на качество формообразования. Априорно

учитывать эти факторы не представляется возможным. Нами реализованы типовые компьютерные системы статистического оценивания и оптимизации динамических процессов с возможностями универсального применения для различных реализаций современных технологий. Предлагаемые методы и подходы обеспечивают возможности управления оборудованием в процессе функционирования за счет двухэтапного получения знаний о фундаментальных свойствах реализуемых технологических процессов и влиянии возмущений на качество формообразования.

На определенных этапах создания информационно-управляющих систем нами обоснованы и реализованы подходы с использованием методов искусственного интеллекта. Методы искусственного интеллекта и машинного обучения могут использоваться для отслеживания систем в реальном времени [1, 2]. С быстрым развитием искусственного интеллекта для решения задач автоматизированного контроля качества было предложено глубокое обучение. Глубокое обучение – это подобласть машинного обучения, которая пытается изучить абстракции высокого уровня в данных, используя иерархическую архитектуру [3 – 5]. Чтобы обеспечить алгоритмы эффективного интеллектуального мониторинга важно объединить аппаратное обеспечение (например камеру, источник света) и программные сервисы (например, масштабируемые вычислительные ресурсы и обновление моделей) для создания более сложных систем автоматизированного контроля и управления.

Предложенные методы и подходы моделирования апробированы на различных предприятиях машиностроения при обработке деталей на токарных, токарно-фрезерных и шлифовальных станках как универсальных, так и с ЧПУ. Результаты проверки позволили обосновать новые принципы автоматизированного контроля и оптимальной настройки технологических процессов в реальном времени и

создать автоматизированную систему оценки их качества, позволяющую повысить оперативность и достоверность принимаемых управляющих решений за счет проведения оптимизации непосредственно на действующем оборудовании. На основе изложенных выше методов и подходов получены новые результаты при реализации плазменных технологий модификации геометрически сложных поверхностей изделий машиностроения, направленных на повышение износостойкости, твердости и других технических характеристик рабочих поверхностей изделий прецизионного машиностроения. Достаточно полная апробация методов, подходов, процедур и критериев принятия решений для различных технологий позволяет их рекомендовать для универсального применения. Далее представлена реализация информационных систем при управлении сложными объектами различного технологического назначения.

Методы и подходы

Реализованы методы и сформировано программно-математическое обеспечение компьютерных систем статистического оценивания и оптимизации технологических процессов в реальном времени по критериям обеспечения их инвариантности к внешним возмущающим воздействиям на основе научного и эмпирического обоснования соответствующих математических моделей и информационных технологий. Обеспечена двухэтапная процедура настройки параметров системы управления. Для этого в работе обоснованы эффективные алгоритмы идентификации параметров и свойств рабочих процессов в реальном времени.

С учётом сложности динамических процессов, протекающих в системе при данных технологических операциях, а также большого числа факторов неопределённости, оказывающих влияние на качество продукции,

целесообразным в некоторых случаях является использование методов машинного обучения для расширения возможностей систем управления. Были учтены проблемные ситуации, связанные с отсутствием достаточно полной и апробированной научной базы в области отображения динамики процессов из-за их обозначенных выше свойств (квазистационарность и нелинейность реализуемых процессов) [6], возникновение новых динамических состояний при управляемом изменении режимных параметров, определяющих необходимость дополнительной идентификации этих состояний в пределах допустимых областей и времени их существования. При плазменной модификации эти свойства проявляются, например, под действием вариаций параметров структуры и физико-механических свойств материала рабочей части инструмента, приводящих к изменению скоростей тепловых процессов нагрева и охлаждения, что существенно влияет на повышение прочности и, как следствие, эксплуатационной надежности инструмента. При механической обработке проявление этих свойств связано с действием различных возмущений (прежде всего силовых), изменяющих состояние станка и процесса резания и порождающих новые состояния, которые существенно отличаются от начального. Полное и точное априорное моделирование основных характеристик процессов практически невозможно и нецелесообразно (даже с учетом возможностей современных ЭВМ и высокопроизводительных специализированных контроллеров) из-за их многообразия и конечного времени существования моделей. Также часто возникает необходимость дополнительного решения сложных задач, в частности задачи распознавания образов.

Оценивание идентифицируемых процессов осуществлялось на основе следующих статистических критериев и процедур. Критерий Краскела-Уоллиса – это обобщение критерия U Манна-Уитни. Этот критерий

представляет собой непараметрический аналог однофакторного дисперсионного анализа и обнаруживает различия в положении распределения. Этот критерий предполагает, что k генеральных совокупностей, из которых взяты выборки, априори не упорядочены. Целевое назначение критерия в наших исследованиях – оценка воспроизводимости результатов модификации. Критерий Фридмана является непараметрическим критерием, предназначенным для проверки однородности статистических данных. Используется для оценки значимости результатов модификации. «Ящик с усами» – график, использующийся в описательной статистике, компактно изображающий одномерное распределение вероятностей. Такой вид диаграммы в удобной форме показывает медиану (или, если нужно, среднее), нижний и верхний квантили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы. Несколько таких ящиков можно нарисовать бок о бок, чтобы визуально сравнивать одно распределение с другим; их можно располагать как горизонтально, так и вертикально. Расстояния между различными частями ящика позволяют определить степень разброса (дисперсии) и асимметрии данных и выявить выбросы.

Целевое назначение – оценка однородности результатов модификации. Линейный регрессионный анализ – это метод изучения статистической взаимосвязи между одной зависимой количественной зависимой переменной от одной или нескольких независимых количественных переменных. Позволяет оценить достоверность модификации. Непараметрический корреляционный анализ является статистическим методом, используемым для оценки силы и направления взаимосвязи между двумя переменными, которые не имеют линейной взаимосвязи. Он основан на рядах данных, а не на фактических значениях. Позволяет провести оценку

постэксплуатационного состояния модифицированного изделия.

Для количественной оценки сигналов используются статистика Херста H [6] и среднее значение интенсивности излучения плазменного облака J . Статистика H представляет собой угол наклона построенной в логарифмических координатах линии регрессии усредненных значений нормированных на стандартное отклонение S размахов сигнала R , представляющих собой разности между максимальными X_{\max} и минимальными X_{\min} накопленными на фиксированном интервале времени отклонениями сигнала от среднего значения, и отображает влияние каждого усредненного показателя (т. е. по сути структуры сигнала) на направление и степень его изменений. Достоверность вычисления статистики Херста зависит от длины реализации регистрируемого электрического сигнала и частоты его дискретизации.

Для механических систем (станочные системы и газоперекачивающие агрегаты) для оценки качества динамических процессов были применены интегративные критерии механических колебаний в системе [7].

Плазменные технологии

При формировании стратегии и алгоритмов управления процессом плазменной технологии были использованы изложенные выше методы и подходы статистического оценивания и моделирования. Модификация проводится в специальной технологической установке за счет формирования СВЧ газового разряда низкотемпературной плазмы непосредственно вокруг поверхности обрабатываемого изделия. Это является основным отличием от всех других подобных технологий и обеспечивает высокую концентрацию энергии воздействия плазмы на обрабатываемой поверхности при низкой потребляемой мощности оборудования. Для представленной

технологии на основе теоретических и экспериментальных исследований обоснована стратегия двухконтурного управления и реализована система адаптивного управления с каналом компенсации возмущений. Выполнена оптимизация взаимодействия электромагнитного и электростатического полей за счет изменения подаваемого на изделие потенциала смещения и анодного тока магнетрона, определяющего уровень подводимой к изделию СВЧ-мощности.

Для проведения исследований было выполнено сопоставление значений предложенного при разработке модели показателя стабильности процесса взаимодействия плазмы с поверхностью изделия с значениями статистики Херста, показавшее наличие сильной обратной пропорциональной связи между ними. Это позволило использовать показатель стабильности для проведения количественной оценки получаемых в ходе исследования данных. Регрессионный и корреляционный анализ полученных в ходе моделирования данных показали, что в условиях изменения параметров изделия имеется возможность повышения стабильности процесса взаимодействия его поверхности с плазмой за счет изменения значений режимных параметров. В ходе регрессионного анализа были получены и изучены зависимости скоростей изменения показателя стабильности от значений параметров изделия как функций потенциала или анодного тока магнетрона. Реализованы каналы обратной связи, позволяющие наблюдать за ходом процесса воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность изделия по параметрам электрического и оптического сигналов. Для количественной оценки сигналов используются в первом случае статистика Херста H (рис. 1) [6], во втором – среднее значение интенсивности излучения плазменного облака J .

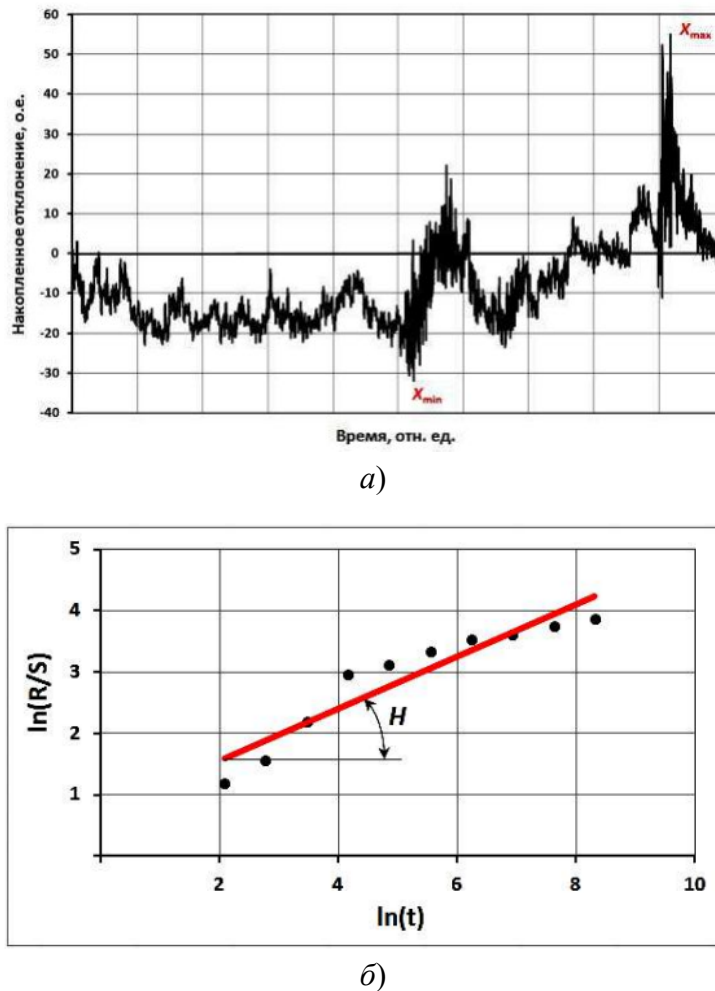


Рис. 1. Исходные данные (а) и схема вычисления (б) статистики Херста

Fig. 1. The initial data (a) and the calculation pattern (b) of Hearst statistics

Станочные системы

Для станочных систем новые принципы автоматизированного контроля и оптимальной настройки технологических процессов основываются на следующих методах и правил принятия решений. Наиболее продуктивным для математического описания данных о колебаниях является их представление смешанной дискретной моделью авторегрессии со скользящим средним (АРСС-модели). Это связано с тем, что АРСС-модель позволяет учитывать ситуацию, в которой каждое единичное возмущение a_t воздействует на динамическую систему не только в момент времени t , но и в последующие моменты, формируя т. о.,

зависимость данных от времени. Различие состоит лишь в том, что величина этого воздействия постепенно ослабевает функции Грина (2) и для устойчивой динамической системы должен быть сходящимся (в данном случае в пределах времени t_p регистрации вибросигнала).

В связи с этим он может рассматриваться как интегральный показатель, отображающий состояние динамической системы оборудования; при этом чем меньше его значение, тем лучше (устойчивее) состояние:

$$Y_t = a_t + G_1 a_{t-1} + G_2 a_{t-2} + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} G_j a_{t-j}. \quad (1)$$

$$J = \int_0^{t_p} |G(t)| dt \quad (2)$$

Возможность использования интеграла (2) для мониторинга состояния была проверена по результатам вычисления времени его сходимости, которое характеризует скорость возвращения динамической системы в положение равновесия.

Обоснован для наблюдения интегральный показатель, названный коэффициентом преобразования спектра и представляющий собой отношение амплитуд колебаний динамической системы на резонансных частотах к суммарной амплитуде колебаний на остальных частотах спектра ее колебаний в пределах некоторого частотного диапазона (см. выражение (3)). В основу же критерия оценки эффективности преобразования энергии было положено обеспечение условий, при которых коэффициент (3) принимает минимальное значение, поскольку это означает максимальное рассеивание динамической системой энергии колебаний; спектр колебаний динамической системы станка при этом становится максимально приближенным к спектру сигнала типа «окрашенный шум», характеризующего состояние станка как устойчивое:

$$St = \sum_{i=1}^n Ampl_i / \sum_{j=1}^m Ampl_j. \quad (3)$$

Применение методов искусственного интеллекта

Для реализации отдельных информационных структур для станочных комплексов и при реализации плазменных технологий нами использовались методы искусственного интеллекта и машинного обучения. Научно обоснована возможность оценки качества поверхности по параметрам микро- и макрогеометрии (шероховатость, волнистость, отклонение от круглости) с помощью

искусственной нейронной сети. Для этих целей нами сформирован программно-математический аппарат, позволяющий проводить оценку качества поверхности (шероховатости) без дополнительных лабораторных замеров. Кроме этого, разработан программно-математический аппарат, позволяющий определять шероховатость поверхности по её изображению с помощью аппарата искусственных нейронных сетей [9]. На основе предложенных принципов формирования информационной технологии интеллектуального мониторинга разработаны алгоритм и программное обеспечение мониторинга состояния инструмента по результатам регистрации и анализа колебательных процессов [10].

В качестве основы при разработке алгоритма использована глубокая нейронная сеть. Разработан метод мониторинга исходного состояния режущего инструмента, основанный на качественном анализе фотографий его поверхности с использованием нейронной сети. Метод позволяет оценивать принципиальную возможность использования инструмента по целевому назначению; определять условия для использования, если оно признается как возможное; оценивать качество процесса эксплуатации. Проведено исследование возможности применения методов искусственного интеллекта для распознавания и количественной оценки качества наноструктурированной поверхности режущего инструмента; проведение апробации результатов оценки на данных, представленных изображениями рабочих поверхностей инструмента до и после низкотемпературного плазменного наноструктурирования. Результатом работы являются алгоритмы и показатели, позволяющие проводить количественную оценку качества поверхности режущего инструмента на основе морфологического анализа ее изображений.

Результаты

В целом, результаты выполненных исследований позволили сделать вывод о том, что использование интегральных показателей и критериев на их основе делает возможным адекватное оценивание процессов, протекающих в оборудовании (как в работоспособном состоянии, так и при его изменениях под действием возмущений) и отображенных через вибросигналы о колебаниях динамической системы, и предложить подход к организации и ведению мониторинга по интегральным показателям вибросигналов.

Алгоритм обработки предоставляет возможность выбора ее схемы: временной или спектральный анализ. В первом случае обработка предполагает построение АРСС-модели методом последовательного перебора моделей-претендентов с вычислением по найденной (по критерию точности представления данных) оптимальной модели интеграла функции Грина (2) и/или времени его сходимости. Во втором случае вначале вычисляются спектр вибросигнала, затем коэффициент его преобразования (3). Для выделения резонансных частот используется процедура «ящик с усами», применяемая в разведочном анализе для поиска выбросов в данных, поскольку основана на различной интерпретации понятия выброса (аномальный, внешний, примыкающий). Это позволяет реализовать несколько схем вычисления числителя коэффициента (3) с последующим выбором той, которая обладает наилучшей чувствительностью к отображению свойств динамической системы рассеивать энергию колебаний. Таким образом, в обоих случаях алгоритм обладает адаптивными свойствами.

Рассматривая алгоритм с позиций практического применения, необходимо отметить, что построение АРСС-модели требует больших временных затрат, но с ее помощью можно анализировать короткие

реализации вибросигналов. Для вычисления спектра времени требуется меньше (особенно при использовании быстрого преобразования Фурье), но необходимо получение более длинных реализаций вибросигналов для обеспечения необходимой точности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М., Шатагин Д.А., Аносов М.С. Нейронно-сетевое моделирование процесса изнашивания твёрдосплавного инструмента // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 398–402.
2. Тугенгольд А.К., Лукьянов Е.А., Волошин Р.Н., Бонилья В.Ф. Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов // Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20. № 2. С. 188–195.
3. Yanming Guo, Yu Liu, Ard Oerlemans, Songyang Lao, Song Wu, Michael S. Lew Deep learning for visual understanding: A review, *Neurocomputing*, Volume 187, 2016, pp. 27–48, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>.
4. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // *Neural Netw.* 61, 2015, pp. 85–117.
5. Ren R., Hung T., Tan K.C. A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection // *IEEE Trans. Cybernet.* 48 (3), 2018, pp. 929–940, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2668395>.
6. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе эволюции свойств процесса обработки // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика.* 2018. Т. 26. № 5. С. 20–38.
7. Азиков Н.С., Бржозовский Б.М., Бровкова М.Б., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Суцкий А.В. Повышение эффективности процесса низкотемпературного плазменного упрочнения на основе организации его мониторинга // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2017, № 6. С. 68–75.
8. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б., Свиридов С.В. Алгоритмизация процедур настройки и диагностирования сложного технологического оборудования по интегральным параметрам вибросигналов // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2013. № 4. С. 53–56.
9. Купцов П.В., Бровкова М.Б., Мартынов В.В. Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2020667034 Российская Федерация. Создание датасета на основе сделанных во внелабораторных условиях фотографий шероховатостей с применением ресегментации и аугментации: № 2020665455: заявл. 30.11.2020; опубл. 21.12.2020 (РИД).

10. Купцов П.В., Купцова А.В., Бровкова М.Б., Мартынов В.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667829 Российская Федерация. Нейронная сеть с архитектурой машинной ассоциации, осуществляющая оценку степени износа режущего инструмента: № 2021666126: заявл. 07.10.2021; опубл. 03.11.2021 (РИД).

REFERENCES

1. Kabaldin Yu.G., Kuzmishina A.M., Shalagin D.A., Anosov M.S. Neural network modeling of the wear process of a carbide cutting tool // Automation. Modern technologies. 2021, vol. 75, no. 9, pp. 398–402.

2. Tugengold A.K., Lukyanov E.A., Voloshin R.N., Bonilla V.F. Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic technological facilities // Bulletin of the Don State Technical University. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 188–195.

3. Yanming Guo, Yu Liu, Ard Oerlemans, Songyang Lao, Song Wu, Michael S. Lew Deep learning for visual understanding: A review, Neurocomputing, Volume 187, 2016, pp. 27–48, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>.

4. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural Netw. 61, 2015, pp. 85–117.

5. Ren R., Hung T., Tan K.C. A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection // IEEE Trans. Cybernet. 48 (3), 2018, pp. 929–940, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2668395>.

6. Zakorotny V.L., Gwindzhilia V.E. Bifurcations of attracting sets of cutting tool deformation displacements at the evolution of treatment process properties. // Izvestia of Higher educational institutions. Applied nonlinear dynamics. 2018, vol. 26, no 5, pp. 20–38.

7. Azikov N.S., Brzhozovsky B.M., Brovkova M.B., Zinina E.P., Martynov V.V., Sussky A.V. Improved efficiency of the process of low-temperature plasma hardening based on its monitoring // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2017, no. 6, pp. 68–75.

8. Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Brovkova M.B., Sviridov S.V. Algorithmization procedures for configuring and diagnosing of complex process equipment on integral parameters of vibration signals // Mechatronics, automation, control. 2013, no. 4, pp. 53–56.

9. Kuptsov P.V., Brovkova M.B., Martynov V.V. Certificate of state registration of the computer program No. 2020667034 Russian Federation. Creating a dataset based on photographs of roughness taken in an out-of-laboratory environment using correction and augmentation: No. 2020665455: application 30.11.2020: publ. 12/21/2020 (RIA).

10. Kuptsov P.V., Kuptsova A.V. Brovkova M.B., Martynov V.V. Certificate of state registration of a computer program No. 2021667829 Russian Federation. Neural network with machine organization association, which evaluates the degree of wear of the cutting tool: No. 2021666126: application 07.10.2021: publ. 03.11.2021 (RIA).

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 20.04.2024; принята к публикации 23.04.2024.

The article was submitted 16.04.2024; approved after reviewing 20.04.2024; assepted for publication 23.04.2024.