

Саблин П. А., Косачев К. Д.
P. A. Sablin, K. D. Kosachev

**ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

**THE SEARCH FOR THE OPTIMAL USE OF DIGITAL TWINS IN THE MACHINING
OF MACHINE PARTS BASED ON THE ANALYSIS LITERARY SOURCES**

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Косачев Кирилл Дмитриевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета, ассистент кафедры «Машиностроение» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Kirill D. Kosachev – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University, Assistant at the Department of Mechanical Engineering (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Аннотация. В статье описано современное состояние вопроса применения цифровых двойников при изготовлении деталей машин механической обработкой. На основании анализа литературных источников выявлены недостатки существующих моделей цифровых двойников, описывающих процесс резания. Предложена блок-схема цифрового двойника процесса резания, который включает в себя цифровые двойники основных компонентов системы резания.

Summary. The article describes the current state of the issue of the use of digital twins in the manufacture of machine parts by mechanical processing. Based on the analysis of literary sources, the disadvantages of existing digital twin models describing the cutting process have been identified. A block diagram of the digital twin of the cutting process is proposed, which includes digital twins of the main components of the cutting system.

Ключевые слова: цифровой двойник, механическая обработка, обработка резанием, шероховатость поверхности, индустрия 4.0, нелинейная динамика, нейросеть.

Key words: digital twin, mechanical processing, cutting, surface roughness, industry 4.0, nonlinear dynamics, neural network.

УДК 621.9

Введение. В рамках концепции четвёртой промышленной революции (так называемой индустрии 4.0) предполагается широкое внедрение в промышленное производство информационных технологий, анализа данных и киберфизических систем – превращение автоматизированного с помощью электроники и вычислительной техники в рамках индустрии 3.0 производства в умное производство. Переход промышленности к индустрии 4.0 повышает эффективность производства, снижает затраты ресурсов при производстве продукции, а также открывает широкие возможности для оптимизации существующих производственных цепочек и процессов путём цифровизации. Одним из возможных вариантов перехода к индустрии 4.0 в обрабатывающей промышленности является цифровой двойник.

Целью работы является выявление недостатков существующих моделей цифровых двойников на основании анализа литературных источников, а также предложение возможных вариантов по оптимизации применения действующих моделей цифровых двойников.

На основании распоряжения Правительства Российской Федерации, утверждающего стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, предполагается, что при реализации стратегического направления необходимы широкое внедрение в промышленности технологий искусственного интеллекта, переход к умному производству [1]. Одной из множества задач, необходимых для цифровой трансформации, является повышение доли предприятий, использующих технологии цифровых двойников.

Цифровой двойник – концепция, впервые предложенная Майклом Гривсом в 2002 году для описания виртуальной копии реального объекта, полностью описывающей его свойства и позволяющей прогнозировать поведение реального объекта путём виртуального моделирования без проведения практических экспериментов [2].

В настоящее время на территории Российской Федерации приняты нормативная документация, стандартизирующая цифровые двойники изделий, и модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 [3; 4], описывающие определения и общую структуру применения данных понятий. Однако определения цифрового двойника, сформулированные разными исследователями с момента создания концепции, отличаются [5–7]. Также неоднозначно понимание концепции цифрового двойника в исследовательской среде. Существуют различные структуры и классификации цифровых двойников в зависимости от сферы применения (логистика наземного и воздушного транспорта, добыча полезных ископаемых, медицина, атомная энергетика, менеджмент качества, строительство, электрические сети, образование, социология, сложные технические изделия, технологические режимы химических производств и т. д.) и масштабов описываемых реальных процессов, но все классификации сходятся к наличию трёх компонентов, являющихся частью цифрового двойника (см. рис. 1):

- наличие реального объекта, с которого производится копирование в цифровую реальность;
- наличие цифрового объекта, копирующего реальный объект;
- наличие двунаправленной связи между реальным объектом и его цифровой копией: цифровая копия получает данные от реального объекта с помощью различных средств автоматизации, например датчиков скорости, вибрации, силы тока, температуры, расхода и т. д., производит обработку полученных сигналов, на основании полученного результата вычислений при обработке прогнозирует (например, при помощи алгоритмов нейронносетового моделирования) и корректирует реальные параметры, привязанные к реальному объекту.

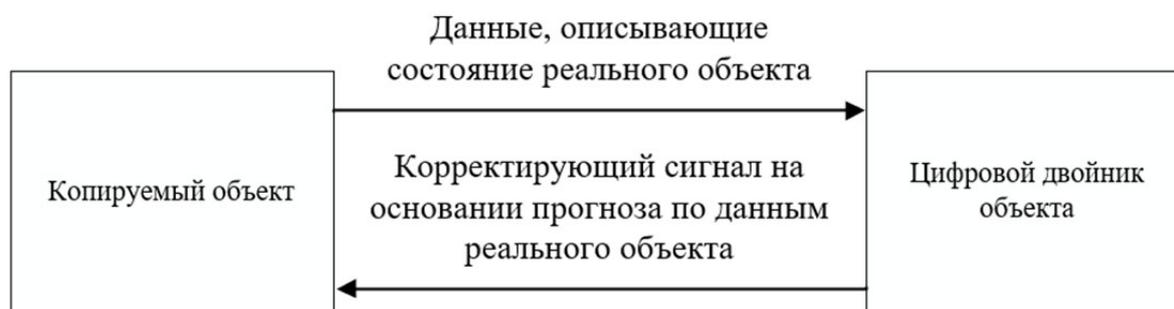


Рис. 1. Базовая схема работы цифрового двойника

Одной из основных задач, стоящих перед исследователями и промышленностью при переходе к цифровому производству и индустрии 4.0, является разработка комплексного цифрового двойника процесса механической обработки материалов, который позволит повысить эффективность процесса механической обработки путём достижения заданного качества поверхности изделия, минимальных потерь материала, наиболее оптимального использования инструмента при заданных режимах резания и материале заготовки, корректной эксплуатации станочного оборудования на основании данных, поступающих от датчиков.

Данный цифровой двойник будет являться одним из компонентов комплексной киберфизической системы производства деталей машин.

Однако в силу нелинейности процессов, происходящих при механической обработке, формирование цифрового двойника, корректирующего входные параметры обработки в процессе производства деталей машин, является нетривиальной задачей.

Обработка деталей машин осуществляется на станочных системах. При индустрии 4.0 станочные системы представляют собой станки с числовым программным управлением (ЧПУ), предоставляющие широкий набор параметров, позволяющий косвенно контролировать процесс производства.

В качестве основных компонентов, которые необходимо включить в процесс цифровизации механической обработки деталей машин (т. е. формирования цифрового двойника), можно рассматривать компоненты системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД), каждый из которых вносит свои лимитирующие факторы при производстве продукции.

В исследованиях [8; 9] авторы предлагают технологию создания и устройство для разработки цифрового двойника станка с ЧПУ. Создание цифрового двойника проходит в два этапа: 1) сбор рабочих характеристик станка, 2) машинное обучение функциональности станка. Предложенное устройство собирает данные систем станка, запоминает, преобразует их и далее переводит в локальную сеть для симуляции работы станка. Но данные исследования требуют дальнейшего развития, формирования прототипа цифрового двойника и затем его экспериментального подтверждения.

В работах [10; 11] разрабатывается цифровой двойник станка лазерной резки листового металла путём моделирования его конструкции и проводятся вычисления мощности лазера, скорости резания и других входных параметров. Данные работы демонстрируют цифровой двойник станочного оборудования, однако они носят узкоспециализированный характер, поскольку станки предназначены только для резки листового металла, а также требуют сбора практических данных и экспериментального подтверждения моделирования.

В работе [12] предлагается концепция формирования цифрового двойника станочного оборудования при помощи трёхмерного сканирования. Данный подход имеет большой потенциал для внедрения и применения в промышленности, поскольку применение трёхмерного сканирования не сопровождается большой сложностью работ, что позволяет быстро получать и использовать полученную модель с данными измерительных приборов станка для разработки цифрового двойника высокой точности, тем самым повышая эффективность производства деталей машин.

Разработанный и детализированный цифровой двойник станка будет позволять смоделировать возможность применения различной технологической оснастки (приспособлений) для установки детали, инструмента и подбора оптимальных комбинаций использования различной технологической оснастки без натуральных испытаний, что позволит существенно снизить временные затраты на подготовку производства.

В работе [13] исследуется зависимость режущей способности шлифовального круга от акустического сигнала, возникающего при обработке деталей. Приём сигнала осуществляется с помощью микрофона. Установлен косвенный критерий зависимости износа шлифовального инструмента от уровня звука, позволяющий оценить состояние инструмента в процессе механической обработки. Данное исследование имеет потенциал для дальнейшего развития и формирования цифрового двойника шлифовального круга, в котором входными данными для цифрового двойника будут являться акустические сигналы из зоны резания. На основании обработки цифровым двойником акустических сигналов возможна корректировка входных параметров процесса механической обработки.

В работе [14] исследуется взаимосвязь износа инструмента с изменением сигналов виброакустической эмиссии (ВАЭ) от инструмента в процессе резания. Выявлены зависимости между сигналами ВАЭ и износом инструмента. Сформулированные математические зависимости позволяют по изменению свойств частотного сигнала ВАЭ идентифицировать износ инструмента. Ввиду широкого использования процесса резания при изготовлении деталей машин механической обработкой данное исследование несёт в себе широкий потенциал по разработке цифрового двойни-

ка инструмента. Входной параметр цифрового двойника – сигналы ВАЭ, на основании сигналов ВАЭ проводится оценка износа инструмента с последующей возможной корректировкой параметров процесса резания.

Важной составляющей при разработке цифрового двойника процесса резания является разработка системы, позволяющей оценивать и контролировать качество обработанной поверхности во время обработки заготовки, тем самым исключая брак в производстве, что особенно актуально при производстве уникальных дорогих наукоёмких изделий.

В работах [15; 17; 18] авторы проводят исследования по управлению динамической устойчивостью процесса резания на основе подходов нелинейной динамики.

В работе [15] установлены корреляционные зависимости между фрактальной размерностью шероховатости поверхности обработанной детали и фрактальной размерностью сигналов ВАЭ, снятых с инструмента в процессе резания. Данный результат предоставляет широкие возможности по управлению шероховатостью поверхности детали в процессе обработки и разработке цифрового двойника путём обработки сигналов ВАЭ в потоке и последующей корректировки входных параметров процесса резания.

В работе [16] представлен цифровой двойник шероховатости поверхности при резании с использованием нейронносетевое моделирование. Производится обучение нейронной сети, входными данными в нейросеть являются входные параметры процесса резания, выходными – фрактальная размерность шероховатости поверхности. При выполнении механической обработки проводится постоянный расчёт фрактальной размерности шероховатости поверхности при помощи обученной нейросети и направляется управляющий сигнал в систему резания для корректировки режима резания и обеспечения заданного качества поверхности. Данное исследование представляет большой потенциал для внедрения в промышленность, однако применение для большой номенклатуры материалов деталей, инструмента, различных режимов резания требует дополнительных время- и трудозатрат по обучению нейронной сети.

В работе [17] авторы проводят исследования взаимосвязи критериев нелинейной динамики (фрактальной размерности, показателя Ляпунова), рассчитанных для сигнала ВАЭ, снятого при резании, с амплитудой колебаний упругой динамической системы. Установлена зависимость между критериями нелинейной динамики и коэффициентом трения, что объясняется ростом энтропии при росте коэффициента трения.

В работе [18] проводится нейронносетевое моделирование процесса трения при резании и экспериментально подтверждаются результаты моделирования коэффициента трения нейросетью. Полученные результаты позволяют оценивать эффективность выбранных режимов механической обработки и расширить возможности по управлению результативностью процессов резания.

В работе [19] приведена модель – цифровой двойник, симулирующая съём слоя металла переменной толщины при круглом врезном шлифовании с ЧПУ, однако отсутствуют экспериментальные подтверждения применимости приведённой модели и применяемых при её создании зависимостей.

В работе [20] приведён алгоритм диагностики силы резания «на ходу» с использованием сигнала силы тока главного движения станка. Данная разработка позволяет использовать взаимосвязь параметра работы станка (сила тока) с параметрами режима резания, что позволит расширить количество факторов, учитываемых цифровым двойником процесса резания при достижении заданного качества деталей машин.

Имеются концепции по созданию цифровых двойников станочного оборудования, а также ограниченно используемые виртуальные модели узкоспециализированных станков. В настоящий момент отсутствуют цифровые копии, описывающие и прогнозирующие состояние станка и его систем в процессе резания. Учёт работы систем станка в цифровом двойнике процесса механической обработки позволит минимизировать негативные факторы, влияющие на процесс обработки.

Существующие работы по оценке износа инструмента требуют более обширного экспериментального подтверждения, однако уже сформированные и подтверждённые зависимости формируют пространство для создания цифровых двойников, позволяющих учитывать фактор износа инструмента при подборе режимов резания и минимизировать его влияние на качество деталей машин.

В настоящий момент наиболее успешное и результативное практическое применение описано в трудах [15–18] по цифровизации управления качеством детали в ходе обработке заготовки. Существующие варианты цифровых двойников шероховатости поверхности, коэффициента трения, процесса круглого шлифования, в том числе с использованием нейронно-сетевое моделирование, позволяют контролировать качество поверхности детали в процессе механической обработки, что повышает эффективность производства и создаёт возможности для дальнейшего масштабирования и использования данных цифровых двойников как компонентов комплексного цифрового двойника процесса механической обработки.

В работе [21] в качестве компонентов цифрового двойника станочной системы (киберфизической системы) рассматриваются четыре основные нейронные сети: силы резания, шероховатости, динамического состояния и износа инструмента.

В рамках четвёртого технологического перехода в настоящий момент перед промышленностью и исследователями стоит задача разработки и опробования комплексной системы моделирования и прогнозирования процесса резания заготовок при производстве деталей машин с заданным качеством, минимальными потерями материала, наиболее оптимальным использованием инструмента при заданных режимах резания и материале заготовки, корректной эксплуатации станочного оборудования на основании данных, поступающих от датчиков.

Заключение. Рассмотрены основные актуальные направления научной деятельности по разработке и экспериментальному подтверждению моделей цифровых двойников компонентов системы СПИД в области механической обработки деталей машин. На основании проведённого анализа литературных источников на рис. 2 авторами предлагается блок-схема комплексного цифрового двойника процесса резания, учитывающая все компоненты системы СПИД как отдельные составляющие процесса, каждая из которых отвечает за отдельные факторы, ведущие к достижению заданного качества продукции.

Цифровой двойник процесса механической обработки

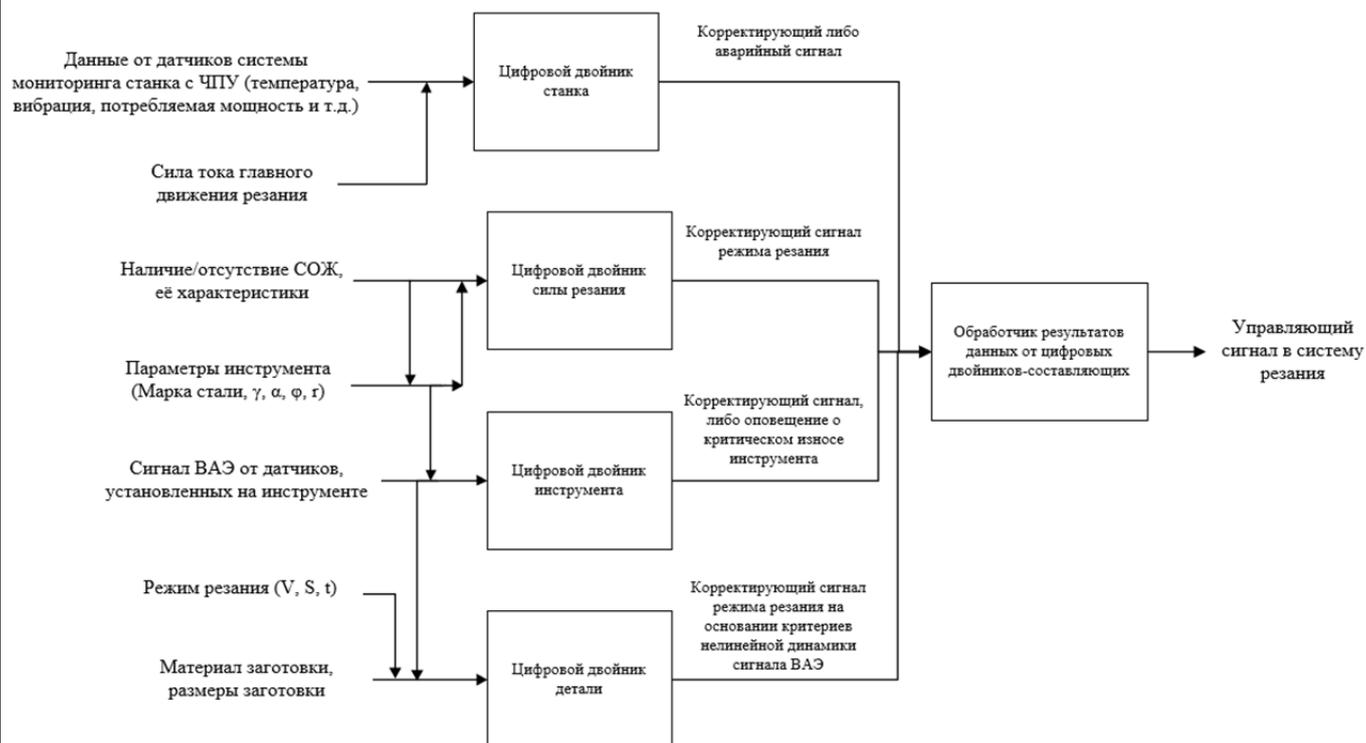


Рис. 2. Блок-схема комплексного цифрового двойника системы обработки деталей машин

Выводы. Предложенный цифровой двойник процесса механической обработки является оптимальным примером применения цифровых двойников, а также следующим этапом в расширении использования цифровых двойников в области обрабатывающей промышленности – создании комплексного цифрового двойника, учитывающего и моделирующего множество компонентов системы и их многофакторное воздействие на результат обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности: утв. распоряжением Правительства РФ от 06 ноября 2021 г. № 3142-р // Правительство России, официальный сайт. – URL: <http://static.government.ru/media/files/Yu4vXEtPvMyDVAw88UuBGB3dGEr6r8zP.pdf> (дата обращения: 10.12.2024). – Текст: электронный.
2. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. Т. 1, 2014. Р. 1-7.
3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: нац. стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. № 979-ст: введён впервые: дата введения 2022-01-01 / разработан ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – IV, 10 с.
4. ГОСТ Р 59799-2021. Умное производство. Модель Эталонной архитектуры и индустрии 4.0 (RAMI 4.0): нац. стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 25 октября 2021 г. № 1301-ст: введён впервые: дата введения 2022-04-30 / разработан Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”». – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – IV, 29 с.
5. Лычкина, Н. Н. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование: теория и практика (ИММОД-2023). – М.: Изд-во АН РТ, 2023. – С. 139-149.
6. Султан, Н. Литературный обзор: применение автоматизированных цифровых производственных систем на основе цифровых двойников / Н. Султан, В. Е. Петров // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 07/2. – С. 168-172.
7. Чернигин, А. Н. Вопрос применения термина «цифровой двойник» в современном информационном обществе / А. Н. Чернигин, С. Б. Плотников // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 03. – С. 123-129.
8. Вихляев, И. И. Технология создания цифрового двойника станка с ЧПУ / И. И. Вихляев, Д. А. Ворох // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы всерос. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 23-26 апреля 2024 г. – Самара: Самарский университет им. Королева, 2024. – С. 38-40.
9. Вихляев, И. И. Устройство для создания цифрового двойника станка с ЧПУ / И. И. Вихляев, Д. А. Ворох // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы всерос. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 23-26 апреля 2024 г. – Самара: Самарский университет им. Королева, 2024. – С. 40-42.
10. Шевченко, А. А. Разработка и применение цифрового двойника станка лазерной резки листового металла для планирования производства на основе анализа потребления ресурсов / А. А. Шевченко // Наука настоящего и будущего. – 2024. – Т. 3. – С. 191-195.
11. Шевченко, А. А. Анализ технологического оборудования станка лазерной резки LVD IMPULS с помощью цифрового двойника / А. А. Шевченко // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: материалы VI всерос. науч.-практ. (с международным участием) конф., в 2 т., 07-08 ноября 2024 г. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 364-369.
12. Возможности использования цифровых двойников станочного оборудования на предприятиях машиностроения / О. А. Рябина, А. И. Болдырев, А. А. Болдырев, Д. Ю. Левин // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2024. – Т. 1. – С. 297-302.
13. Ардашев, Д. В. Исследование взаимосвязи режущей способности инструмента с параметрами акустического сигнала в процессе профильного шлифования / Д. В. Ардашев, А. С. Жуков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24. – № 3. – С. 64-83.

14. Заковоротный, В. Л. Информационные свойства частотных характеристик динамической системы резания при диагностике износа инструментов / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, К. В. Кислов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 114-134.
15. Кабалдин, Ю. Г. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности / Ю. Г. Кабалдин, П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Frontier Materials & Technologies. – 2023. – № 3. – С. 43-51.
16. Цифровой двойник шероховатости обработанной поверхности / Д. А. Шатагин, М. В. Желонкин, М. С. Аносов, Д. Е. Платонов // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 105-13. – С. 234-237.
17. Кабалдин, Ю. Г. Управление устойчивостью трибосистемами при внешнем трении и резании на основе алгоритмов нелинейной динамики, теории фракталов и нейросетевого моделирования / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Иванов, А. А. Башков // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 13. – С. 150-156.
18. Нейронносетевое моделирование процессов трения при резании / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Башков, С. В. Иванов, И. Д. Замураев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 52-58.
19. Акинцева, А. В. Моделирование взаимосвязи силы резания с глубиной резания и объёмами снимаемого металла единичными зёрнами при плоском шлифовании / А. В. Акинцева, П. П. Переверзев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25. – № 4. – С. 6-21.
20. Севастьянов, А. А. Использование пакета Tsfresh для разработки алгоритма диагностики процесса твёрдого точения / А. А. Севастьянов // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: материалы VI Всероссийской научной конф. с междунар. участием, Тольятти, 18-20 апреля 2023 г. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. – С. 97-102.
21. Анализ модели цифровых двойников машиностроительного производства / А. Д. Павлов, М. С. Аносов, Д. А. Шатагин, М. В. Желонкин // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 104-13. – С. 205-207.