

УДК 65.011.56

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-7-30-41

# Интеллектуальное управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств

Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, А.М. Кузьмишина

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24

## Intellectual Management of Manufacturing Equipment in Digital Production

Y.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, A.M. Kuzmishina

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24



e-mail: uru.40@mail.ru, dmitsanych@gmail.com, Foxi-16@mail.ru



Предложена единая базовая управляющая платформа, на основе которой следует разрабатывать новое поколение систем управления технологическим оборудованием и совершенствовать существующие системы ЧПУ для цифровых производств. В качестве такой платформы могут выступать открытые системы ЧПУ станков с большими вычислительными ресурсами и высоким быстродействием обработки большой базы данных, со встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с промышленным интернетом, обеспечивающими возможность использования облачных технологий обработки данных на серверах как предприятий (в локальных сетях), так и провайдеров. Все это создаст основу интеллектуального управления широкой номенклатурой технологического оборудования, оснащенного системами ЧПУ.

**Ключевые слова:** цифровое производство, открытые системы ЧПУ, встроенные модули нейропроцессоров, модуль связи, интеллектуальное управление оборудованием



A unified basic control platform is proposed that could be used for developing a new generation of control systems for manufacturing equipment and improving existing CNC systems for digital production. Open CNC systems of machine tools can be used as such platforms. They have large computing resources and high processing speed of large databases, built-in modules of neuroprocessors and communication modules connected to industrial Internet, enabling the use of cloud data processing technologies on servers of enterprises (in local networks), as well as providers. All this creates a basis for intellectual management of a wide range of technological equipment with CNC systems.

**Keywords:** digital production, open CNC systems, built-in modules of neuroprocessors, communication module, intelligent control of equipment

Правительством РФ принята концепция «Индустрия 4.0» с целью построения цифровой экономики нашей страны. Это обуславливает необхо-

димость изменения подхода к организации и управлению технологическим оборудованием промышленных предприятий. Однако оцифро-

ывание производств в РФ пока не является общенациональной идеей и осуществляется крайне медленно.

К недостаткам существующей организации и управления предприятий, сдерживающих реализацию цифровых технологий, относится отсутствие единой концепции использования систем управления (СУ) технологическим оборудованием вследствие их узкой ориентации на его конкретный вид. При этом не учитывается значительный прогресс в области разработки программного и аппаратного обеспечения систем ЧПУ, позволяющий пользователю расширять их возможности [1].

Это привело к тому, что производители нового оборудования различного назначения вынуждены применять известные системы ЧПУ, не способные в полной мере решать задачи управления в конкретных условиях и не отвечающие требованиям цифровых производств.

В связи с этим следует расширять функциональные возможности систем ЧПУ, интегрировать в них новые модули и подсистемы. Появились также современные методы и гибридные технологии обработки деталей, аддитивные технологии и т. д., требующие использования современных систем ЧПУ. Проблема существенно усложняется тем, что необходимо найти решение, подходящее как к вновь проектируемым, так и к уже успешно работающим СУ технологическим оборудованием (металлообрабатывающими станками, оборудованием для аддитивных технологий, промышленными роботами и т. д.) [2–4].

Таким образом, в настоящее время отсутствует единая базовая управляющая платформа, на основе которой разрабатывалось бы новое поколение СУ технологическим оборудованием для цифровых производств. Такие платформы должны обладать значительными вычислительными ресурсами и высоким быстродействием обработки большой базы данных (БД). Это существенно сократит расходы на разработку и эксплуатацию технологического оборудования, а также обеспечит его вхождение в единое информационное пространство целого предприятия.

Отсутствие базовой платформы управления технологическим оборудованием сдерживает также разработку новых высокопроизводительных методов изготовления деталей (высокоскоростную обработку, аддитивные и гибридные технологии обработки и т. д.) и эф-

фективность цифровых производств [5, 6]. Создание единой платформы управления оборудованием решит и другую важную задачу — технологическую безопасность страны в целом, так как большая часть предприятий оборонного комплекса, оснащена импортным оборудованием и СУ.

Цель работы — формирование нового подхода к управлению оборудованием цифровых производств, разработка базовой унифицированной платформы, создание на ее основе новых и применение существующих СУ технологическим оборудованием.

В качестве такой единой платформы могут выступать открытые системы ЧПУ станков [2] со встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с промышленным интернетом, т. е. с возможностью использования облачных технологий обработки больших данных на серверах как предприятий (в локальных сетях), так и провайдеров. Все это создает основу для интеллектуального управления широкой номенклатурой технологического оборудования, оснащенного системами ЧПУ с расширенными возможностями (как указывалось ранее), оборудованием для высокоскоростной обработки, а также при решении задач, связанных с реализацией аддитивных технологий и т. д. Кроме того, появляется возможность интегрировать в системы управления подсистемы диагностики, например, динамического состояния оборудования, износа инструмента и т. п. [7–11].

В связи с этим в НГТУ им. Р.А. Алексева была разработана единая платформа расширения функциональных возможностей различного технологического оборудования с ЧПУ на основе встраиваемых в него модулей высокопроизводительных вычислений и глубокого обучения искусственного интеллекта (ИИ) с использованием технологий Nvidia CUDA [3–5], что позволяет осуществлять масштабирование на базе графических процессоров (GPU).

ИИ — это системы, способные понимать, прогнозировать и потенциально функционировать без участия человека, т. е. создавать безлюдные технологии. Системы (алгоритмы) ИИ уже могут реагировать на голосовые команды, а также самообучаться и выдавать готовые решения, обеспечивая информационную безопасность, что достигается с помощью облачных технологий [4]. Считается, что слияние ИИ и облачных вычислений станет источником инноваций и драйвером обеих технологий.

В частности, облако обеспечит ИИ информацией, а ИИ, в свою очередь, будет заполнять его новыми данными. БД в облаке можно разместить на серверах как предприятия, так и провайдеров и использовать в режиме online.

При применении нейросетевых моделей прежде всего встает вопрос выбора конкретной архитектуры нейронной сети (НС): числа слоев и количества нейронов в каждом из них. Размер и структура НС должны соответствовать существу исследуемого явления. Поскольку на начальном этапе анализа природа явления еще неизвестна, выбор архитектуры НС является непростой задачей, часто связанной с длительным процессом интуитивного выбора на основе перебора разных вариантов.

Затем построенная НС подвергается обучению (рис. 1). На этом этапе нейроны сети итеративно обрабатывают входные данные и корректируют свои синаптические веса так, чтобы НС могла формировать адекватные выходные сигналы. По сути, процесс обучения НС представляет собой подгонку модели, которая реализуется сетью, к обучающим данным, характеризующим различные варианты условий протекания моделируемого технологического процесса.

Ошибка конкретной конфигурации НС определяется путем прогона через сеть всех имеющихся наблюдений входных параметров  $\bar{U}(t)$  процесса и сравнения значений выходных параметров модели  $\bar{W}_m(t)$  и реального технологического процесса  $\bar{W}(t)$ . Все эти разности суммируются в так называемую функцию ошибок. Ее значение и есть ошибка модели сети. Обучение проводится до тех пор, пока ошибка НС не достигнет приемлемо малого значения.

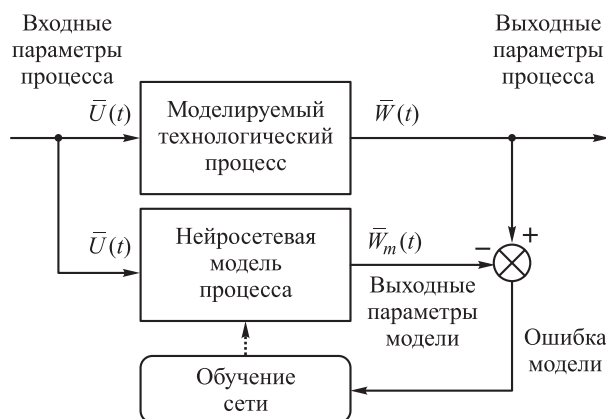


Рис. 1. Схема обучения нейросетевой модели технологического процесса

Сеть, полученная в результате обучения, выражает закономерности, присутствующие в данных. При таком подходе она оказывается функциональным эквивалентом зависимостей между переменными, подобным тем, которые строятся в традиционном моделировании. Однако в отличие от традиционных моделей в случае НС эти зависимости нельзя записать в явном виде. Иногда НС реализуют модели очень высокого качества, однако они представляют собой типичный пример нетеоретического подхода к исследованию. При таком подходе основные усилия сосредотачиваются исключительно на практическом результате — адекватности модели, а не на сути механизмов, лежащих в основе явления.

Следует отметить, что методы НС применимы и в таких исследованиях, цель которых — построение объясняющей модели явления, поскольку НС помогают изучать данные на предмет поиска значимых переменных или их групп, и полученные результаты могут облегчить процесс последующего построения модели.

Одно из главных достоинств НС состоит в том, что они, по крайней мере теоретически, способны аппроксимировать любую непрерывную функцию. Поэтому исследователю нет необходимости заранее выдвигать гипотезы относительно модели, причем в ряде случаев даже о том, какие переменные действительно важны. Однако существенный недостаток НС заключается в том, что окончательное решение зависит от начальных установок сети, и, как отмечалось ранее, его практически невозможно интерпретировать в традиционных аналитических терминах, используемых при построении теории явления.

Такую сеть можно легко интерпретировать как модель вход-выход, в которой синаптические веса и пороговые смещения нейронов являются свободными параметрами модели. Эта НС способна моделировать функцию практически любой сложности, причем числа слоев и элементов в каждом из них определяют сложность функции.

В работах [9, 12–14] показано, что применение динамических моделей процессов механической обработки, построенных на основе НС, в СУ металлорежущими станками позволяет контролировать динамическую устойчивость процесса резания, добиваясь при этом повышения его точности и производительности. Поэтому НС были использованы нами [9, 12–14]

при решении вопросов, связанных как с динамикой резания, так и с применением аддитивных технологий и высокоскоростной обработкой деталей на станках с ЧПУ, в частности, для оптимизации траектории движения инструмента и выявления так называемой безвибрационной обработки, т. е. установившегося режима движения.

Основной причиной потери устойчивости процесса резания при высокоскоростном фрезеровании служит возникновение резонансных явлений на одной из собственных частот динамической системы резания. Механизм возникновения резонанса заключается в следующем. Поверхность, обработанная при любом обороте фрезы, имеет незначительную волнистость вследствие прерывистого характера резания. При каждом последующем обороте фрезы происходит резание по следу, т. е. частота врезания ее лезвий в обрабатываемую поверхность накладывается на волнистость, оставшуюся от ее предыдущего оборота. Если колебания фрезы совпадают по фазе с волнистостью поверхности, то наступает резонанс — лавинообразное нарастание амплитуды автоколебаний. Динамическая система резания теряет устойчивость.

При большой скорости резания, свойственной высокоскоростному фрезерованию, процесс потери устойчивости приводит не только к ухудшению качества обработанной поверхности, но и к очень скорому выходу из строя шпинделя станка. Например, при неправильно заданной частоте вращения резонансные явления могут полностью привести в негодность высокоскоростной шпиндель всего за 3 ч. При надежном контроле над устойчивостью процесса резания высококачественный шпиндель должен прослужить до нескольких лет. Отказ шпинделя — одна из самых серьезных поломок высокоскоростных металлорежущих станков, требующая длительного и дорогостоящего ремонта. Для устранения неустойчивого процесса резания необходимо найти оптимальную область частот вращения шпинделя, при которых резонанс будет отсутствовать.

Таким образом, если при обычном фрезеровании любого материала имеют место два общеизвестных ограничения по эксплуатационным свойствам станка и инструмента, то при высокоскоростной обработке к ним добавляется еще одно, накладываемое динамической системой резания.

Два первых ограничения определяются и вносятся в паспорт станка или инструмента на заводе-изготовителе. Численные значения ограничений, накладываемых динамической системой резания, можно оценить только непосредственно на производстве. Это объясняется тем, что частотные характеристики не являются присущими ни шпинделю, ни станку в отдельности, а служат характеристикой всей системы шпиндель–инструмент–заготовка. Стоит изменить любой из этих компонентов, как тут же получается другая система, для которой должны быть найдены иные оптимальные параметры резания.

Обычно оптимальные частоты вращения высокоскоростного шпинделя ищут экспериментальным путем с помощью метода пробных подходов для каждой операции фрезерования. Но такой способ контроля процесса устойчивости резания не является эффективным.

По-видимому, более рациональной методикой является формирование для каждого станка персонального динамического паспорта, исходя из которого можно назначать режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность и гарантированную устойчивость упругой системы этой машины. Пример использования двухслойной НС для составления динамического паспорта станка (ДПС) приведен на рис. 2, где входными параметрами НС являются скорость резания  $v$ , подача  $S$  и глубина резания  $t$ , а выходным — информационная энтропия аттрактора  $H$ , используемая

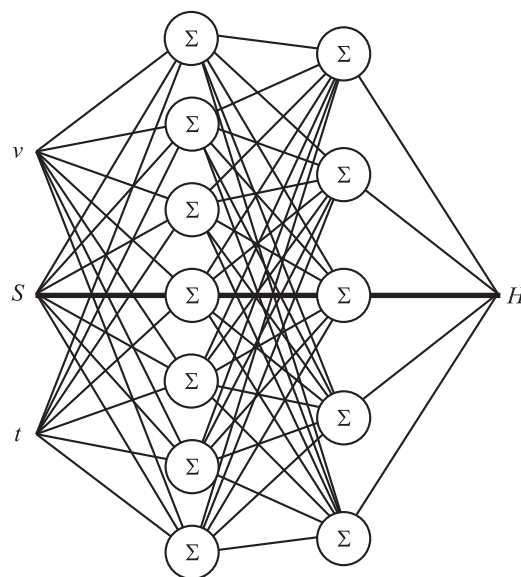


Рис. 2. Пример использования двухслойной НС для составления ДПС (Σ — сумматоры)

в качестве критерия устойчивости динамической системы резания.

Следует отметить, что попытки составить различного рода персональные таблицы и БД самых благоприятных режимов резания для фрезерных станков предпринимаются уже давно, но именно в авиационной промышленности для высокоскоростного фрезерования алюминиевых и титановых сплавов метод персональной паспортизации станков является наиболее перспективным.

Специфика высокоскоростного фрезерования накладывает ограничения на форму и материал инструмента. Таким образом, остается не очень большое количество вариантов состава системы шпиндель–инструмент–заготовка, для которых следует выявить динамические характеристики и занести их в паспорт.

Кроме того, процедуру паспортизации динамических свойств станков необязательно осуществлять вручную, можно применять различные автоматизированные методы. Например, эффективная экспресс-методика составления ДПС достаточно успешно реализуется на базе алгоритмов нелинейной динамики [9, 12–14] с построением модели динамической системы резания по временной реализации ее выходных параметров.

В качестве выходных параметров системы могут выступать сигналы, зафиксированные разнообразными датчиками, установленными в непосредственной близости от зоны резания и отражающими динамику процесса обработки.

Далее по имеющейся временной реализации одной наблюдаемой динамической переменной (например, сигнала виброакустической эмиссии (ВАЭ), полученного в процессе резания) можно сконструировать аттрактор, основные свойства которого будут такими же, как у динамической системы резания в целом. Последующий анализ реконструированного аттрактора позволяет определить тип динамики процесса резания (хаотичный или регулярный) при текущих режимах, степень устойчивости динамической системы станка и значение возмущающих воздействий, способных вывести систему из устойчивого состояния с переходом к хаосу или разрушающему резонансу.

Аналогично аттрактор системы резания можно построить по сигналам датчиков, регистрирующих радиальные колебания вала высокоскоростного шпинделя, независимо от физи-

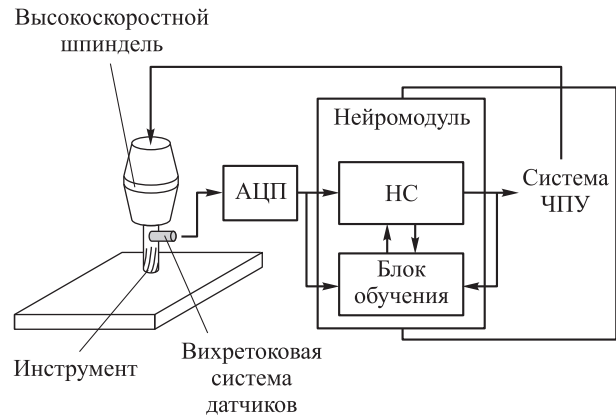


Рис. 3. Схема замкнутого контура управления высокоскоростным шпинделем при использовании НС для первоначального формирования ДПС и последующей оптимизации на его основе режимов резания (АЦП — аналого-цифровой преобразователь)

ческой природы датчиков, будь то пьезоэлектрические виброакселерометры, лазерные виброметры или наиболее перспективные, на наш взгляд, для применения в реальных производственных условиях вихретоковые датчиковые системы.

Результаты исследования реконструированных по сигналам датчиков аттракторов [2, 3, 12–14], характеризующих степень устойчивости динамической системы резания при различных режимах обработки, составят информационную основу ДПС.

Для того чтобы исключить практику пробных проходов, следует формировать ДПС на основе многослойной НС (см. рис. 2), которая будет обучаться, анализируя динамику резания в процессе обычной штатной работы станка и аппроксимируя недостающую информацию для тех режимов обработки, где исследования устойчивости динамической системы станка еще не проводились.

Другими словами, составление ДПС будет происходить автоматизировано (без вмешательства человека) путем обучения НС или, если взглянуть шире, посредством самообучения замкнутой схемы динамическая система резания–датчики–НС–СУ станком (см. рис. 3). Визуализацию ДПС и сравнительный анализ таких паспортов для различных станков можно проводить с помощью карт устойчивости — двумерных выборок, отражающих степень устойчивости динамической системы станка при разных вариантах режимов резания. Примеры таких карт приведены на рис. 4,



где область 1 соответствует устойчивому состоянию системы резания, области 2 и 3 — зонам сильной вибрации высокоскоростного шпинделя.

Обученная НС в соответствии с содержащимся в ней ДПС сможет сама назначать частоту вращения высокоскоростного шпинделя, оптимальную для данных условий обработки, т. е. возьмет на себя функцию, более свойственную системам САМ (Computer-aided manufacturing), чем СУ станком. Причем в этом случае для динамической корректировки условий процесса резания нет необходимости усложнять СУ станком различными элементами САМ-систем, достаточно дополнить систему ЧПУ нейропроцессором или нейронным модулем [12].

Для управления и диагностики устойчивости процесса резания также разработана интеллектуальная система анализа и прогнозирования динамического состояния технологических систем при удаленном доступе. Система состоит из БД динамического состояния станка, СУ БД, НС анализа и прогнозиро-

вания динамического состояния технологической системы, НС диагностики и классификации неисправностей, программного обеспечения для анализа сигнала ВАЭ. БД динамического состояния станка содержит сведения о векторе технологических параметров и соответствующем векторе динамического состояния, полученного в ходе экспериментальных исследований. Структура БД динамического состояния системы резания станка приведена на рис. 5.

БД динамического состояния системы резания станка, расположенная на удаленном вычислительном сервере предприятия, получает посредством протокола передачи данных ТСР/IP информацию о векторе технологических параметров, векторе неисправностей, параметрах измерительной аппаратуры и соответствующем векторе динамического состояния. Для этого стойку ЧПУ станка, имеющую свой IP-адрес, подключают к беспроводной сети Wi-Fi.

Сигнал ВАЭ, поступающий с датчиков вибрации, оцифровывается и передается на вычислительный сервер. Сигнал фильтруется, записывается на жесткий диск и подвергается дальнейшей обработке: определяются спектр сигнала, значения средней и максимальной амплитуд, энтропия сигнала, реконструируется аттрактор системы резания на основе теоремы Такенса, вычисляются его фрактальная размерность и старший показатель Ляпунова [9, 12–14]. В качестве фильтров используются полосовые фильтры для удаления частот вынужденных колебаний и wavelet фильтр для подавления шумовой составляющей.

Полученные данные из сигнала ВАЭ передаются в БД динамического состояния, где им соответствуют конкретные значения вектора технологических параметров системы. Таким образом, на всем протяжении работы технологической системы происходит постоянное пополнение БД (рис. 6) динамического состояния. Это позволяет оперативно отслеживать любые изменения в этой системе и увеличивать ее адаптивные возможности.

После накопления определенного количества информации о динамическом состоянии станка происходит обучение НС регрессионного анализа, которая связывает значения вектора технологических параметров с соответствующим вектором динамического состояния (рис. 7).

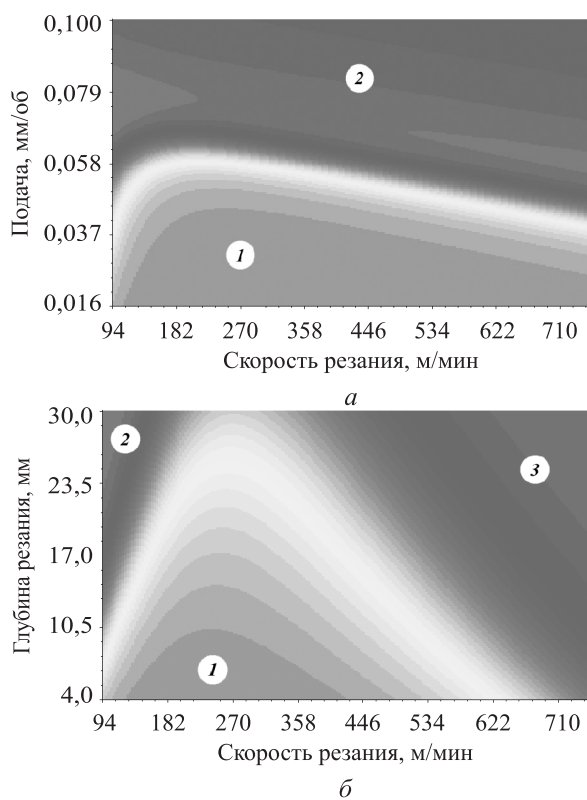


Рис. 4. Карты устойчивости динамической системы высокоскоростного фрезерования в координатах «подача — скорость резания» (а) и «глубина резания — скорость резания» (б)

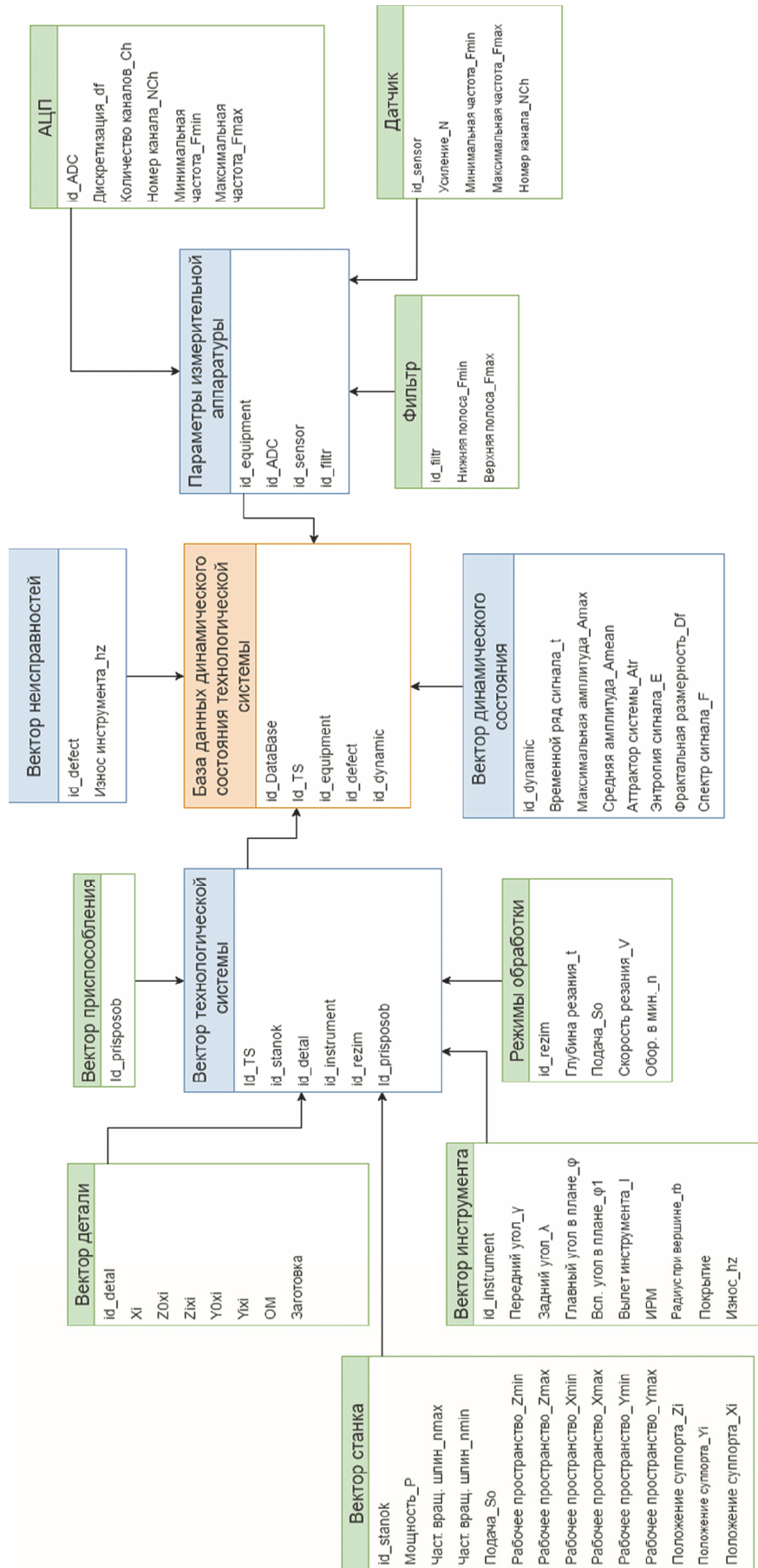


Рис. 5. Структура БД динамического состояния системы резания станка

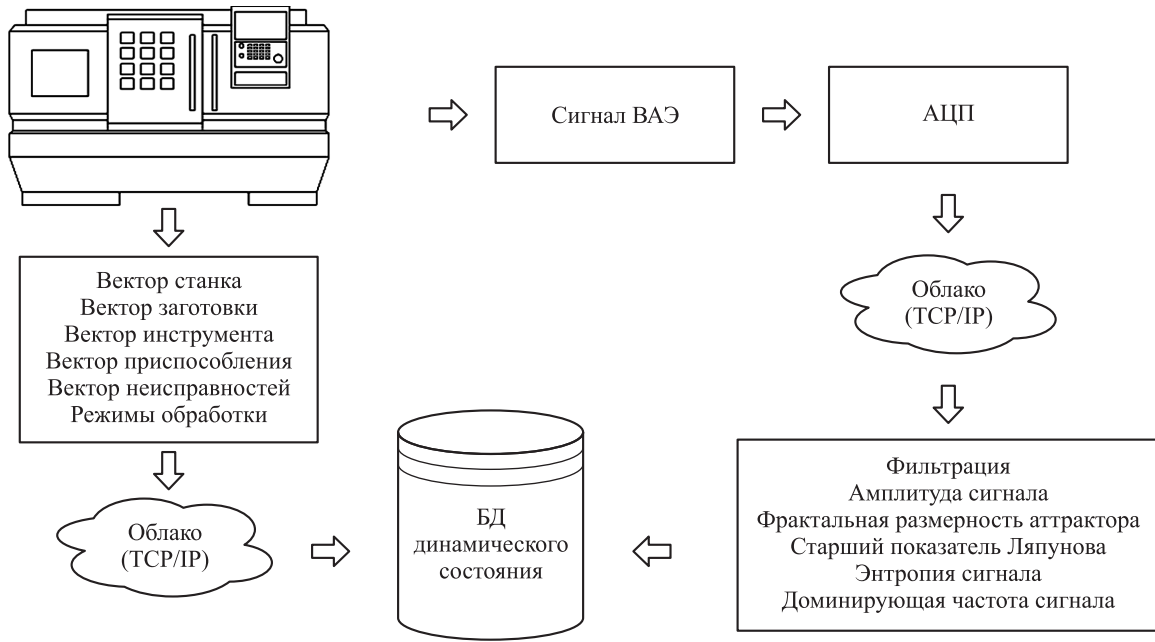


Рис. 6. Процесс заполнения БД динамической устойчивости станка

Входной слой нейронов состоит из десяти нейронов. На их вход подается информация о векторах станка, детали, инструмента, приспособления и режимов обработки из БД динамического состояния. Выходной слой нейронов включает в себя пять нейронов, которые характеризуют вектор динамического состояния, со-

держащий сведения об амплитуде автоколебаний, доминирующей частоте, фрактальной размерности аттрактора, энтропии сигнала и старшего показателя Ляпунова. Обучение нейронной сети (см. рис. 7) происходит методом обратного распространения ошибки с использованием метода градиентного спуска для

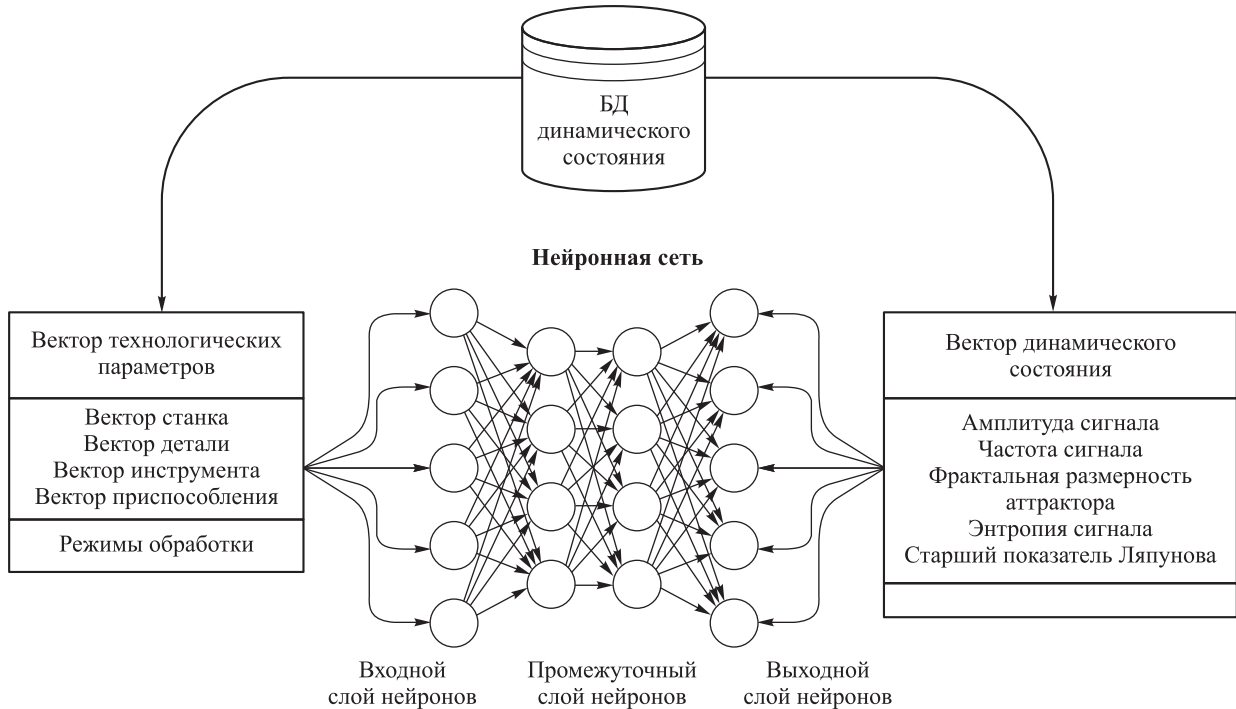


Рис. 7. Процесс обучения НС для анализа и прогнозирования динамического состояния станка



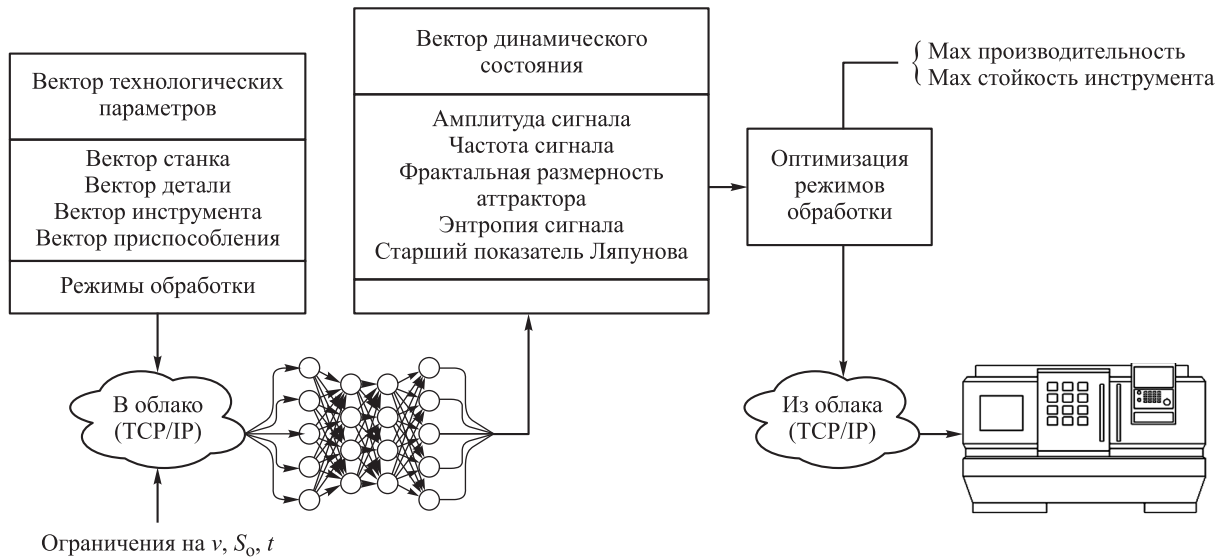


Рис. 8. Процесс определения оптимальных значений режимов обработки для заданного вектора технологических параметров

минимизации значения ошибки и оптимизации количества нейронов в скрытом (промежуточном) слое.

Для обучения НС используются обучающая и проверочная выборки из БД динамического состояния. Если ошибка достигает 5 %, то НС прекращает обучение.

Вследствие большого объема поступающих данных и необходимости постоянного переучивания НС применялись подходы параллельных вычислений с использованием GPU и технологии nVidia CUDA, в частности специализированная библиотека cuDNN.

Эта библиотека содержит оптимизированные для GPU реализации сверточных и рекуррентных сетей, различных функций активации (полулинейной, сигмоидальной, гиперболического тангенса) и оптимизированный алгоритм обратного распространения ошибки. Такой подход позволил повысить производительность обработки в 5–7 раз.

По окончании обучения НС способна моделировать динамическое состояние технологической системы с целью оптимизации режимов обработки и вектора параметров. Для этого НС (рис. 8) путем перебора вектора технологических параметров и наложенных ограничений моделирует различные динамические состояния этой системы, которые поступают на блок оптимизации, где рассчитываются минимумы или максимумы целевых функций.

После определения оптимальных значений вектора технологических параметров данные поступают по протоколу связи TCP/IP на стойку

ЧПУ и учитываются при механической обработке. Таким образом, интеллектуальная система анализа и прогнозирования динамического состояния технологического оборудования способна определять оптимальные значения режимов обработки и геометрии инструмента, а также способ закрепления детали в соответствии с особенностями конкретного оборудования и формы детали.

## Выводы

1. Предложена единая базовая платформа управления станками с ЧПУ на основе встраивания в них модулей нейропроцессоров с высокопроизводительными вычислениями и модулей связи с промышленным интернетом.

2. Применение динамических моделей процессов механообработки на основе искусственных НС в системах управления станками с ЧПУ позволяет контролировать динамическую устойчивость процесса резания как отдельного станка, так и группы станков и повышать точность и качество обработки.

3. Использование облачных технологий в управлении технологическим оборудованием обеспечивает оперативный контроль за процессом обработки благодаря постоянному сбору данных о нем при удаленном доступе, а также дает возможность прогнозировать не только текущее, но и будущее состояние процесса обработки путем высокопроизводительных вычислений с помощью технологии nVidia CUDA и подходов глубокого обучения НС.

## Литература

- [1] Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Принципы построения систем с ЧПУ с открытой архитектурой. *Приборы и системы управления*, 1996, № 8, с. 18–21.
- [2] Кабалдин Ю.Г., ред. *Искусственный интеллект и кибер-физические механообрабатывающие системы в цифровом производстве*. Нижний Новгород, Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. 271 с.
- [3] Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. *Повышение эффективности процессов механообработки на основе подходов искусственного интеллекта и нелинейной динамики*. Москва, Инновационное машиностроение, 2018. 184 с.
- [4] Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств на основе искусственного интеллекта и облачных технологий. *Итоги 2017 года: научные исследования и разработки. Сб. мат. междунар. науч.-практ. конф.*, 20 января 2018, Иркутск, Научное партнерство «Апекс», 2017, с. 94–107.
- [5] Селиванов С.Г., Шайхулова А.Ф., Поезжалова С.Н., Яхин А.И. *Инновационное проектирование цифрового производства в машиностроении*. Москва, Инновационное машиностроение, 2016. 264 с.
- [6] Буханченко С.Е. *Международная сетевая магистерская программа создания цифровых предприятий*. URL: [http://portal.tpu.ru:7777/departments/kafedra/arm/ns/ms1/pr\\_tempus.pdf](http://portal.tpu.ru:7777/departments/kafedra/arm/ns/ms1/pr_tempus.pdf) (дата обращения 13 марта 2018).
- [7] Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В. Трехмерная печать методом электродуговой наплавки плавящимся электродом при производства деталей из металлов на станках с ЧПУ. *Science XXI Century. Proceedings of materials the international scientific conference*, 30–31 июля 2015, Karlovy Vary, Moscow, Киров, Международный центр научно-исследовательских проектов, 2015, с. 56–61.
- [8] Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Серый С.В., Шатагин Д.А. Наноструктурирование контактных поверхностей твердосплавного инструмента при резании. *Вестник машиностроения*, 2014, № 7, с. 74–79.
- [9] Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С.В. Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального и вейвлет анализов с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и Nvidia CUDA. *Вестник машиностроения*, 2014, № 8, с. 80–82.
- [10] Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И. Хаотическая динамика технологических систем. *Вестник машиностроения*, 2013, № 4, с. 71–74.
- [11] Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Диагностика износа режущего инструмента на основе фрактального и вейвлет-анализа с использованием искусственного интеллекта в режиме реального времени с возможностью удаленного доступа. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2013, № 5(102), с. 183–189.
- [12] Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В. *Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта*. Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2003. 201 с.
- [13] Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, 2014, № 2, с. 47–50. URL: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-2.pdf> (дата обращения 15 января 2018).
- [14] Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Вытнов Ю.В., Голубев С.В. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием Nvidia CUDA в программной среде LABVIEW. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2013, № 5(102), с. 114–121.

## References

- [1] Sosonkin V.L., Martinov G.M. Printsipy postroeniia sistem s ChPU s otkrytoi arkhitekturoi [Principles of CNC systems with open architecture]. *Pribory i sistemy upravleniia* [Instruments and control systems]. 1996, no. 8, pp. 18–21.
- [2] *Iskusstvennyy intellekt i kiber-fizicheskie mekhanoobrabatyvayushchie sistemy v tsifrovom proizvodstve* [Artificial intelligence and cyber-physical machining systems in digital manufacturing]. Ed. Kabaldin Yu.G. Nizhniy Novgorod, Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva publ., 2018. 271 p.
- [3] Kabaldin Iu.G., Kretinin O.V., Shatagin D.A., Kuz'mishina A.M. *Povyshenie effektivnosti protsessov mekhanoobrabotki na osnove podkhodov iskusstvennogo intellekta i nelineinoy dinamiki* [Improving the efficiency of machining processes based on artificial intelligence approaches and nonlinear dynamics]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie publ., 2018. 184 p.
- [4] Kabaldin Iu.G., Shatagin D.A., Kuz'mishina A.M. *Upravlenie tekhnologicheskim oborudovaniem predpriiatiia v usloviakh tsifrovyykh proizvodstv na osnove iskusstvennogo intellekta i oblachnykh tekhnologii* [Management of technological equipment of the enterprise in the conditions of digital productions on the basis of artificial intelligence and cloud technologies]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Itogi 2017 goda: nauchnye issledovaniia i razrabotki* [Results of 2017: research and development. Proceedings of the international scientific-practical conference]. 20 January 2018, Irkutsk, Nauchnoe partnerstvo «Apeks» publ., 2017, pp. 94–107.
- [5] Selivanov S.G., Shaikhulova A.F., Poezhalova S.N., Iakhin A.I. *Innovatsionnoe proektirovanie tsifrovogo proizvodstva v mashinostroenii* [Innovative design of digital production in mechanical engineering]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie publ., 2016. 264 p.
- [6] Bukhanchenko S.E. *Mezhdunarodnaia seteivaia masterskaia programma sozdaniia tsifrovyykh predpriatii* [International network master's program in digital business]. Available at: [http://portal.tpu.ru:7777/departments/kafedra/arm/ns/ms1/pr\\_tempus.pdf](http://portal.tpu.ru:7777/departments/kafedra/arm/ns/ms1/pr_tempus.pdf) (accessed 13 March 2018).
- [7] Kabaldin Iu.G., Kolchin P.V. *Trekhmernaia pechat' metodom elektrodugovoi naplavki plaviashchimsia elektrodom pri proizvodstva detalei iz metallov na stankakh s ChPU* [Three-dimensional printing method of electric arc welding by melting electrode in the production of metal parts on CNC machines]. *Science 21 Century. Proceedings of materials the international scientific conference*, 30–31 July 2015, Karlovy Vary, Moscow, Kirov, Mezhdunarodnyi tsentr nauchno-issledovatel'skikh proektov publ., 2015, pp. 56–61.
- [8] Kabaldin Iu.G., Kretinin O.V., Seryi S.V., Shatagin D.A. *Nanostrukturirovanie kontaktnykh poverkhnosti tverdosplavnogo instrumenta pri rezanii* [Nanostructuring of contact surfaces of hard alloy tool at cutting]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2014, no. 7, pp. 74–79.
- [9] Kabaldin Iu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Seryi S.V. *Diagnostika vykhodnykh parametrov protsessa rezaniia v rezhime real'nogo vremeni na osnove fraktal'nogo i veivlet analizov s ispol'zovaniem programmno-apparatnykh sredstv National Instruments i Nvidia CUDA* [Diagnostics of output parameters of cutting process in real time mode based on fractal and wavelet analyses using National Instruments and Nvidia CUDA software and hardware]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2014, no. 8, pp. 80–82.
- [10] Kabaldin Iu.G., Oleinikov A.I. *Khaoticheskaya dinamika tekhnologicheskikh system* [Manufacturing system chaotic dynamics]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2013, no. 4, pp. 71–74.
- [11] Kabaldin Iu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Zotov V.O., Seryi S.V. *Diagnostika iznosa rezhushchego instrumenta na osnove fraktal'nogo i veivlet-analiza s ispol'zovaniem iskusstvennogo intellekta v rezhime real'nogo vremeni s vozmozhnost'iu udalennogo dostupa* [Diagnosis tool wear based on the fractal and wavelet analysis using artificial intelligence in real time with remote 183 access capabilities]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2013, no. 5(102), pp. 183–189.
- [12] Kabaldin Iu.G., Bilenko S.V., Seryi S.V. *Upravlenie dinamicheskimi protsessami v tekhnologicheskikh sistemakh mekhanoobrabotki na osnove na osnove iskusstvennogo intellekta* [Con-

trol of dynamic processes in mechanical processing technological systems based on artificial intelligence]. Komsomolsk-na-Amure, Komsomolsk-na-Amure state university publ., 2003. 201 p.

- [13] Kabaldin Iu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Zotov V.O., Seryi S.V. Intellektual'nye sistemy diagnostiki sostoianiiia oborudovaniia i iznosa instrumenta [Intelligent Diagnostic System the Plant and Tool Wear]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2014, no. 2, pp. 47–50. Available at: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-2.pdf> (accessed 15 January 2018).
- [14] Kabaldin Iu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Vytnov Iu.V., Golubev S.V. Otsenka sostoianiiia rezhushchego instrumenta v rezhime real'nogo vremeni na osnove podkhodov nelineinoini dinamiki s ispol'zovaniem Nvidia CUDA v programmnoi srede LABVIEW [Evaluation of cutting tool in real time based approaches nonlinear dynamics using Nvidia CUDA software environment LABVIEW]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2013, no. 5(102), pp. 114–121.

Статья поступила в редакцию 11.04.2018

## Информация об авторах

**КАБАЛДИН Юрий Георгиевич** (Нижний Новгород) — заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения». ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева» (603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: [uru.40@mail.ru](mailto:uru.40@mail.ru)).

**ШАТАГИН Дмитрий Александрович** (Нижний Новгород) — старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения». ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева» (603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: [dmitsanych@gmail.com](mailto:dmitsanych@gmail.com)).

**КУЗЬМИШИНА Анастасия Михайловна** (Нижний Новгород) — старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения». ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева» (603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: [Foxi-16@mail.ru](mailto:Foxi-16@mail.ru)).

## Information about the authors

**KABALDIN Yuriy Georgievich** (Nizhny Novgorod) — Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machine Building Technology and Equipment. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: [uru.40@mail.ru](mailto:uru.40@mail.ru)).

**SHATAGIN Dmitriy Aleksandrovich** (Nizhny Novgorod) — Senior Lecturer, Department of Machine Building Technology and Equipment. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: [dmitsanych@gmail.com](mailto:dmitsanych@gmail.com)).

**KUZMISHINA Anastasia Mikhailovna** (Nizhny Novgorod) — Senior Lecturer, Department of Machine Building Technology and Equipment. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: [Foxi-16@mail.ru](mailto:Foxi-16@mail.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Интеллектуальное управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 7, с. 30–41, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-30-41.

### Please cite this article in English as:

Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. Intellectual Management of Manufacturing Equipment in Digital Production *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 7, pp. 30–41, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-30-41.