



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-241-261

EDN: TIZGFN

УДК 658.5:006.015.5

Научная статья / Research article

## Автоматизация выбора подрядчиков с применением искусственных нейронных сетей для повышения качества и технологической безопасности

А.С. Миллер

Балтик Винд Групп, Гамбург, Германия

✉ a.miller@baltic-wind.de

### История статьи

Поступила в редакцию: 26 апреля 2023 г.

Доработана: 3 июля 2023 г.

Принята к публикации: 15 июля 2023 г.

### Ключевые слова:

управление качеством, геометрическое распознавание конструкции изделий, семантический анализ, конструктивно-технологическая сложность, машинное обучение, мультиагентные системы, нейросети

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы оценки трудоемкости, определения технологической возможности изготовления изделий, обеспечения качества, оптимизации технологических процессов, формирования базы знаний, машинного обучения и автоматической обработки входящих запросов на предприятиях машиностроительной отрасли. Поднимается проблема обеспечения качества при выполнении государственного заказа, предлагаются решения для исключения возможности субъективных оценок и директивного ценообразования при заключении контрактов во избежание принятия заведомо невыполнимых обязательств. Представлены устоявшиеся практики обработки входящих запросов на машиностроительных предприятиях, выявляются проблемы, анализируется их влияние на технологическую безопасность машиностроительной отрасли. Проведен обзор актуальных российских и зарубежных исследований по теме и предлагаемых решений в области применения инструментов семантического анализа, мультиагентных систем и искусственных нейросетей в работе машиностроительных предприятий.

### Для цитирования

Миллер А.С. Автоматизация выбора подрядчиков с применением искусственных нейронных сетей для повышения качества и технологической безопасности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 241–261. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-241-261>



## Automation of contractors' selection applying artificial neural networks to increase quality and technological security

Andrej S. Miller 

Baltic Wind Group, *Hamburg, Germany*

✉ a.miller@baltic-wind.de

### Article history

Received: April 26, 2023

Revised: July 03, 2023

Accepted: July 15, 2023

### Keywords:

quality management, geometric and optical character recognition of parts, semantic analysis, constructive-technological complexity, machine learning, multi-agent systems, neural networks

**Abstract.** The research considers problems of labour-intensiveness estimation, determination of technological feasibility of manufacturing, quality assurance, optimisation of technological processes, formation of knowledge base, machine learning and automatic processing of incoming enquiries at machine-building enterprises. The research raises the problem of quality assurance when performing a state order and offers solutions to eliminate the possibility of subjective estimates and directive pricing at contracting, in order to avoid making knowingly unrealizable commitments. The author considers established practice of processing incoming orders at machine-building enterprises, identifies problems, analyses their impact on the technological safety of the machine-building industry. A review of current Russian and foreign research on the topic and proposed solutions in the application of semantic analysis tools, multi-agent systems and artificial neural networks in the work of machine-building enterprises is given.

### For citation

Miller AS. Automation of contractors' selection applying artificial neural networks to increase quality and technological security. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):241–261. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-241-261>

### Введение

Современная экономика с каждым годом сталкивается с вызовами, не позволяющими предприятиям продолжать работать по методикам, сложившимся в ходе XX в. и воспринимавшимся долгое время в профессиональной среде как константа. Политические кризисы, эмбарго, нарушение стабильности поставок энергоносителей и попытки перехода на новые виды энергии в ряде стран погружают мировую экономику в перманентную лихорадку, которая вряд ли когда-то сменится долгосрочной стабильностью и предсказуемостью [1].

Отраслевые стандарты и правовая база, регулирующие машиностроительную отрасль, сформировались преимущественно в 60-е гг. XX в. в рамках четвертого технологического уклада. Этот технологический уклад базировался на энергии углеводородов, тогда же началось развитие атомной энергетики, и основными отраслями промышленности были автомобилестроение, цветная металлургия, нефтехимия и другие отрасли, для которых характерным было массовое,

поточное и крупносерийное производство. Горизонты планирования были длинными, поставки энергоносителей — стабильными, торговые отношения — долгосрочными, а производственные планы — стабильными. Постоянное участие человека в производственном процессе, а также в экономическом планировании и управлении производством было необходимым, трудовые отношения строились на базе 40-часовой рабочей недели и постоянного присутствия сотрудников на рабочих местах. Развитие современных технологий конструирования, проектирования, планирования и самого производства требует кардинального переосмысления подхода к промышленной кооперации и выстраиванию отношений «заказчик–исполнитель». Внешнеполитические угрозы, технологическое соперничество и взаимные торговые барьеры уже не позволяют государствам и корпорациям играть по правилам свободного рынка, а вынуждают искать новые механизмы обеспечения собственного технологического суверенитета, обеспечения технологической безопасности и бесперебойной работы критически важных отраслей [2].

Специфика работы предприятий энергетического, общего и специального машиностроения предполагает выполнение технологически сложных, часто единичных или мелкосерийных заказов, которые редко повторяются. Весь технологический процесс выстраивается под конкретный заказ для обеспечения конструкционных и технологических требований заказчика. Ядро компетенций таких предприятий часто составляет уникальное технологическое оборудование, позволяющее работать с особо крупными заготовками, обеспечивать особую точность механической обработки или производить детали со сложной геометрией, например турбинные лопатки. При этом технологическая оснастка создается под каждый конкретный заказ и часто уничтожается после его выполнения, если заказ был единичным и его повторение не планируется.

В текущих рыночных условиях такие машиностроительные предприятия часто не обеспечены стабильными заказами и вынуждены долгое время простаивать в поиске новых контрактов. Перерывы между крупными заказами могут достигать нескольких лет, в течение которых кадровый состав предприятий может меняться. Все это приводит к необходимости заново выстраивать производственные процессы и систему управления качеством продукции при получении нового заказа. Кроме того, еще в ходе обработки входящих запросов и подготовки технико-коммерческих предложений часто не представляется возможным опереться на накопленный опыт предприятия из-за смены инженерных кадров и отсутствия постоянно пополняемой базы знаний с возможностью быстро найти подходящий прецедент из истории прошлых заказов. В итоге технико-коммерческие предложения готовятся на основе нередко устаревших нормативов и справочников, а также субъективных оценок профильных служб предприятия — от технических до экономических. В условиях жесткой конкуренции и часто борьбы предприятий за выживаемость решения о ценообразовании и контрактации часто принимаются руководителями предприятий с высокой долей субъективных оценок и носят волюнтаристский характер. Проблему таких технологически необоснованных волевых решений и директивного ценообразования подробно рассматривали

исследователи в области хозяйственного права и управления предприятием<sup>1</sup>. Следствием таких решений нередко становится взятие на себя задомо невыполнимых обязательств по срокам, цене и качеству продукции. Если на этапе заключения контракта заказчик не провел углубленного аудита качества поставщика и не потребовал приведения его производственной системы в соответствие со своими требованиями, в том числе в области качества, то нередко возникает риск либо полного срыва заказа, либо его существенной задержки с привлечением субподрядчиков и согласованием карты отклонений при итоговой приемке. Для машиностроительной отрасли часто это означает срыв сроков ввода в эксплуатацию критически важных для государства объектов, таких как электростанции, ледоколы и военные корабли, что ставит под угрозу технологический суверенитет, энергетическую безопасность и общую обороноспособность страны [4; 5].

Другой фактор риска, связанный с устоявшейся практикой обработки заказов и пренебрежением созданием базы знаний предприятий, связан с выживаемостью самих предприятий в условиях повышения прозрачности процессов закупок и роста технических и финансовых требований к поставщикам. Машиностроительные предприятия, не имевшие крупных заказов в течение нескольких лет, часто не соответствуют требованиям для участия в тендерах как по опыту, так и по финансовой состоятельности. Парк оборудования при этом может быть уникальным, а само предприятие представлять критическую важность для отрасли, но из-за длительного отсутствия заказов и острой конкуренции с крупными корпорациями и иностранными поставщиками нередко такой простой заканчивается банкротством. За последние 20 лет только в Санкт-Петербурге прекратили свое существование несколько сотен заводов, среди которых предприятия с уникальными машиностроительными компетенциями такие, как АО «Сестрорецкий инструментальный завод», ОАО «Петербургский трамвайно-механический завод», ЗАО «Вагонмаш» и ряд производств в рамках Кировского завода. Нередко из-за расположения производственных корпусов таких предприятий на дорожных земельных участках их банкротство пред-

<sup>1</sup> Рустамова И.Т. Обоснование контрактных цен: учебно-методическое пособие. М.: Юридический институт, МИИТ, 2012. 211 с.

ставляет интерес и для их собственников — частных лиц, которым эти предприятия достались по итогам залоговых аукционов и приватизации первой половины 1990-х гг. В результате отрасль лишается машиностроительных мощностей и уникального оборудования, что также ставит под угрозу технологический суверенитет и нередко приводит к зависимости от импорта.

Таким образом, российская машиностроительная отрасль ввиду устоявшейся практики работы с заказами и вследствие роста нестабильности внешней среды сталкивается с рядом проблем:

1. Длительные сроки обработки заказов и низкая точность оценок трудоемкости, технологических возможностей и стоимости.

2. Срывы сроков, неисполнение технологических требований заказчика, непредсказуемый рост стоимости, неудовлетворительное качество готовой продукции и угрозы срыва ввода в эксплуатацию критически важных машиностроительных изделий.

3. Длительный простой уникальных машиностроительных мощностей с последующим банкротством и ликвидацией предприятий, имеющих большой потенциал для отрасли.

**Постановка целей и задач.** *Цель исследования* — разработка концептуального решения вышеупомянутых проблем. Разрабатываемое решение позволит построить устойчивую отраслевую систему взаимодействия заказчиков и исполнителей, которая обеспечит возможность быстро и без субъективных оценок определять принципиальную возможность изготовления запрашиваемых изделий, выявлять оптимальные технологические маршруты и оценивать примерную стоимость исполнения контракта с минимальной погрешностью.

Для достижения этой цели необходимо решить ряд задач: изучить и проанализировать устоявшиеся практики обработки заказов в машиностроении, сформировать перечень процессов, требующих формализации и автоматизации, разработать и создать программный инструмент, позволяющей быстро и точно обрабатывать заказы, обеспечивать требуемый уровень качества, накапливать знания и бесконечно обучаться [6].

Для достижения цели исследования применялись теоретические методы в виде анализа литературы и применяемых подходов, выявление и постановка проблем. Также с учетом практического опыта автора в машиностроительной отрасли

применялись эмпирические методы в виде наблюдения за работой производственных систем предприятий российского и зарубежного машиностроения, анализа их сильных и слабых сторон, разработки экспериментального программного средства и описания логики работы предлагаемого программного средства для решения обозначенных проблем.

## 1. Обзор устоявшейся практики обработки запросов в машиностроении

В устоявшейся на сегодняшний день практике обработки заказов на машиностроительных предприятиях решение о принципиальной возможности изготовления запрашиваемого продукта зависит как минимум от инженеров-конструкторов и инженеров-технологов, специалистов по планированию производства и специалистов по снабжению.

С точки зрения инженера, заказ может быть исполнен при соблюдении следующих условий:

1. Состав технологического оборудования и его техническое состояние соответствуют требованиям конструкторской документации (КД).

2. Имеющийся персонал в состоянии выполнить работу в соответствии с требованиями КД.

3. Имеющиеся в распоряжении предприятия средства контроля качества позволяют произвести проверку продукции в целом и по отдельным ее элементам на предмет соответствия КД и в соответствии с условиями приемки заказчика продукции.

С точки зрения специалиста по планированию, заказ может быть выполнен в установленные сроки при соблюдении следующих условий:

1. Наличие достоверной маршрутной технологии.

2. Наличие ресурса оборудования в соответствующие периоды времени.

3. Наличие ресурса персонала в соответствующие периоды времени.

С точки зрения специалиста по снабжению, необходимы:

1. Физическая и коммерческая возможность поставки материала.

2. Возможность поставки всех требуемых материалов и услуг субподрядчиков в заданный период времени.

В конечном итоге речь идет о разработке следующих документов:

1. Технологический процесс с соответствующими материальными спецификациями (основной заказ + подготовка производства)

2. График использования производственных мощностей по видам и категориям оборудования на период исполнения заказа.

3. График материально-технического обеспечения заказа.

В устоявшейся практике обработки заказов в машиностроении подготовка этих документов в полном объеме и с надлежащим качеством в период согласования заказа и принятия решения о контрактации, как правило, не производится, поскольку требует времени и материальных затрат, которые еще нельзя отнести на счет конкретного проекта.

В ходе работы над заказом на большинстве предприятий принято руководствоваться не документами, а оценками профильных служб, т.е. набором субъективных мнений. Документы рождаются в случае заключения договора и фактического начала работ. По мере появления этих документов выявляется разница между принятыми на себя обязательствами и реально располагаемыми возможностями — невозможно обработать изделие с требуемой точностью, отсутствуют необходимые средства измерения и контроля, параметры имеющегося оборудования не соответствуют параметрам запрашиваемого изделия. В ходе производства к теоретическим несоответствиям возможностей предприятия требованиям заказчика добавляются казусы исполнителей. В итоге нередко даже при формально корректном исполнении условий договора, после приемки результатов, заказчик больше не заинтересован в продолжении сотрудничества с данным исполнителем и ищет альтернативного поставщика, исполнитель входит в период простоя, поиска новых заказов и борьбы за выживание<sup>2</sup>.

Для решения проблемы необходимо найти инструментарий разрешения нескольких пар противоречий:

1) сроки оценки заказа — трудоемкость и качество инженерных расчетов;

2) инженерные требования к изделию — фактические технологические возможности, в том числе возможности технического контроля;

3) сроки исполнения заказа — балансы загрузки необходимого оборудования во времени.

## 2. Семантический анализ деталей и сборочных единиц

Для разрешения этих противоречий целесообразно использовать разбивку конструкции изделия в соответствии с чертежом на конструкторско-технологические признаки на основе машиностроительных классификаторов. По результатам такой разбивки можно сделать укрупненную маршрутизацию технологического процесса без привязки к мощностям предприятия. Базовым результатом операции будет установленное соответствие между конструкторскими требованиями к исполнению деталей и сборочных единиц (ДСЕ) и конкретными единицами оборудования, позволяющими эти требования выполнить. Дополнительным результатом будут укрупненные технологические маршруты и перечень работ по каждой ДСЕ, выполняемым по кооперации.

Конструкторско-технологические требования ДСЕ, а также необходимые характеристики по качеству для решения вышеописанной задачи целесообразно приводить к формализованному виду. Для удобства проведения предлагаемой проверки соответствия параметров ДСЕ параметрам технологического оборудования требования первых и возможности последних должны быть выражены количественно и формализованы в строгой неменяющейся последовательности. Одним из видов такого представления могут быть так называемые кортежи данных — структурированные блоки информации, каждая часть которых отведена под конкретный аспект. Посредством совмещения таких кортежей данных по ДСЕ и по единицам оборудования можно быстро выявлять степени соответствия и делать заключения о принципиальном наличии или отсутствии технологической возможности изготовить требуемые ДСЕ с заданным уровнем качества. Такая технология перебора и совмещения информации, широко применяемая в программировании под названием «парсинг», является семантическим анализом и способна существенно ускорить задачу рассмотрения входящего запроса.

В рамках этого же формального алгоритма конструкторско-технологической оценки изделия реализуются и задачи управления качеством через задание степени соответствия технических требований и технических возможностей (стро-

<sup>2</sup> Вольф Е.В., Хвостов А.Б., Ивченко Б.П., Сизова А.А. Антикризисное управление: учебное пособие. СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2022. 102 с.

гое совпадение, требования превышают возможности, возможности перекрывают требования).

Укрупненный маршрут и состав привлекаемого оборудования позволяют определить с достаточно высокой точностью технологическое время на изготовление ДСЕ и производственную себестоимость продукции.

Полученные данные позволяют встроить изготовление рассматриваемых ДСЕ в технологические балансы производственных мощностей предприятия, а также укрупненно определить время и стоимость их изготовления. Данный подход позволяет миновать ряд трудоемких конструкторско-технологических предварительных работ при принятии решения по рассматриваемому заказу. При использовании такого подхода достигается ключевое конкурентное преимущество — оперативность принятия решения по заказу при минимальных затратах трудовых ресурсов в сравнении с устоявшимся подходом, когда этот процесс занимает несколько недель и часто не заканчивается подписанием контракта, что приводит к высоким и непродуктивным затратам работников предприятия [7].

Устоявшаяся практика обработки запросов в современном российском машиностроении строится на принципах технико-экономического планирования, широко распространенных еще в советский период. Различные службы предприятия, участвующие в процессе рассмотрения входящего запроса, оценки трудоемкости и принятия решения о взятии заказа в работу, часто ввиду внутренних конфликтов и других причин действуют разобщенно — эту проблему рассматривал журнал *Forbes*, теоретики управления производством и специалисты по управлению персоналом. Часто эта разобщенность выражается в том, что какие-то элементы процесса дублируются, срок рассмотрения запроса достигает нескольких месяцев, а заложенные с большим запасом риски ввиду неопределенности в расчетах ведут к заведомо неконкурентным ценам. Все это существенно снижает привлекательность предприятия

как партнера, сокращает количество принятых заказов по отношению к количеству входящих запросов, но, тем не менее, требует значительных ресурсов на содержание аппарата производственной системы<sup>3</sup> [8].

Чтобы избавиться от несогласованности в действиях производственных служб, минимизировать трудозатраты, существенно сократить время обработки входящих запросов и повысить достоверность технико-коммерческих оценок целесообразно рассматривать производственную систему как единый организм с признаками мультиагентной системы. Основные цели производственной системы предприятия — это максимизация загрузки мощностей, выполнение коммерческих обязательств, обеспечение требуемого уровня качества продукции и максимизация прибыли.

Производственная система включает в себя совокупность элементов, таких как технологическое оборудование, внутрипроизводственная транспортная инфраструктура, подъемно-транспортное оборудование, заготовки в исходном состоянии и в процессе изготовления, готовая продукция, производственные и складские площади и др. Они имеют параметры и характеризуются мотивированным поведением. Современные средства коммуникации и контроля позволяют этим элементам поддерживать связь между собой, передавать и интерпретировать данные о взаимных состояниях и сохранять автономность. Рассматриваемые элементы могут быть представлены в качестве агентов, преследующих свои цели, общающихся между собой и обеспечивающих при правильной организации системы синергетический эффект. Совокупность агентов, их связей и взаимного влияния, подчиняющегося ряду закономерностей, представляет собой мультиагентную систему. Появляется возможность быстрого перераспределения ролей агентов, что дает системе вариативность и обеспечивает большую стабильность за счет нахождения нескольких состояний равновесия системы<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> См.: *Коришнова Л.А., Кузьмина Н.Г.* Управление и организация производства: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 193 с.; Как преодолеть разобщенность между подразделениями? // *WRIKE*. URL: <https://www.wrike.com/ru/blog/kak-preodolet-razobshhennost-mezhdu-podrazdeleniyami/?ysclid=lfu2hu4yt292884141> (дата обращения: 10.03.2023).

<sup>4</sup> *Антохина Ю.А., Варжанетян А.Г., Семенова Е.Г., Смирнова М.С.* Экспертная оценка и управление инновационными проектами с учетом факторов неопределенности среды: учебное пособие. СПб.: Изд-во ГУАП, 2021. 242 с.

### 3. Мультиагентная природа производственной системы предприятия

Идея мультиагентных систем была предложена еще в середине XX в. советским математиком М.Л. Цетлиным, занимавшимся исследованием коллективного поведения автоматов. Уже тогда агентами были названы искусственные существа, способные воспринимать и интерпретировать сигналы, поступающие из внешней среды, а также формировать свои. Эти искусственные существа не имели априорных знаний об окружающей их среде и наличии других подобных существ, но имели цель своей деятельности и способность оценивать поступающие сигналы в контексте достижения этой цели. Набор откликов на изменения среды позволял говорить о наличии рациональности в поведении такого рода агентов и их способности к адаптации к изменениям внешней среды [9].

В современной практике мультиагентность успешно применяется в ракетных комплексах и системах групповой самоорганизации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В зависимости от условий среды, внешнего воздействия и изменений параметров задачи группы отдельные ракеты, БПЛА или другие беспилотные устройства моментально обмениваются информацией, адаптируются к изменениям, перегруппируются и при необходимости перераспределяют роли. Для построения таких децентрализованных самоорганизующихся интеллектуальных систем применяются роевые алгоритмы, построенные по принципу алгоритмов пчелиной колонии и социального поведения птиц и рыб в стае. К таким мультиагентным системам относятся самоорганизующиеся сети MANET (Mobile Ad Hoc Network), применяемые в телекоммуникации и управлении объектами критической инфраструктуры, VANET (Vehicular Ad Hoc Network), применяемые на транспорте и FANET (Flying Ad Hoc Network), используемые для управления группами БПЛА. Отличие применения подобных алгоритмов и сетей в мультиагентной системе машиностроительного предприятия состоит в масштабе и сложности задачи, а также в кратно более высоком количестве параметров [10; 11].

Технически реакция производственной системы предприятия на входящий запрос, распределение и перераспределение ролей, а также получение оценок технологических возможностей должно происходить мгновенно как с целью

минимизации времени обработки запросов, так и с целью повышения достоверности оценок на заданный период времени. Это обуславливает необходимость автоматизированной работы системы, что технически может быть решено с помощью различных аппаратных инструментов. К программным средствам, позволяющим работать с мультиагентными системами, относятся такие программные комплексы, как СПРУТ, MongoDB, JADE, ABLE, Repast, MASON.

Характер поведения элементов производственной системы, объединенных общими целями, позволяет считать их интеллектуальными агентами мультиагентной системы, которые обладают следующими свойствами:

- автономность (способность функционировать без внешнего вмешательства, контролировать свои действия и внутреннее состояние);
- активность;
- коммуникативность (взаимодействие с другими агентами);
- реактивность (способность адекватно реагировать на действия других агентов и изменения внешней среды);
- целенаправленность действий;
- наличие базовых знаний о себе и других агентах;
- убеждения (переменная часть базовых знаний, меняющихся во времени);
- желания (стремления к определенным состояниям);
- намерения (планируемые действия по достижению желаемых состояний);
- обязательства (выполнение задач, поставленных другими агентами).

В ряде случаев агенты системы должны быть готовы дублировать свои функции или дополнять функции друг друга ради достижения общих целей системы, являющихся приоритетными по отношению к целям конкретных агентов. При этом информация, предоставляемая агентами друг другу, должна быть исключительно достоверной.

По характеру взаимодействия с внешней средой агенты могут быть реактивными — не имеющими представления о внешней среде, собственных ресурсов, базы знаний и цели действия, а также интеллектуальными — постоянно накапливающими информацию о внешней среде и других агентах и способными к анализу информации. Именно построение универсального алгоритма работы между интеллектуальными аген-

тами, формирование интерактивной базы знаний и постоянно обучающегося центра подготовки решений и позволит создать аппаратное средство для ускоренной обработки входящих запросов, достоверных технико-коммерческих оценок и проектирования технологических процессов на базе постоянно пополняемой базы знаний и непрерывного машинного обучения<sup>5</sup>.

#### 4. Решение задачи оптимизации с применением теории графов

Практика применения ускоренной оценки трудоемкости входящего запроса предполагает способность производственной системы отображать пространство логических возможностей по всем переделам и операциям, выполнение которых может потребоваться при работе над входящим запросом. Если обратиться к литературоведению, то принято считать, что пространство возможностей литературных сюжетов конечно и сводится к узкому набору типовых, каждый из которых является не описанием одного события, а повествует о совокупности нескольких событий, в том числе различных по своей природе. Такая совокупность служит основой типового сюжета, повторяемость которого наблюдается во множестве, на первый взгляд, совершенно не похожих друг на друга литературных произведений. По такому же принципу множество изделий машиностроения производится с использованием ограниченного набора основных технологических переделов и совокупности групп оборудования в этих переделах. Пространство логических возможностей технологических переделов имеет привязки по группам к единицам имеющегося оборудования, либо к субподрядным возможностям, либо к их сочетаниям. Выбор необходимых переделов из исходного пространства возможностей происходит одновременно с семантическим анализом, когда требования к ДСЕ совмещаются с параметрами оборудования и специализированных рабочих мест с учетом критериев обеспечения качества. В свою очередь, набор комбинаций, где выполняются правила, формирует вариативное пространство альтернативных технологических цепочек, из которых посредством совокупности критериев определяются наиболее применимые. Если по собственным или субподрядным

возможностям соответствие не устанавливается, то рассматриваемый заказ в текущих условиях заведомо невыполним. Следует отказать от выполнения, что экономит трудовые и материальные ресурсы и исключает риск невыполнения контрактных обязательств.

Алгоритм семантического анализа и выявления соответствия необходимых технологических переделов группам оборудования можно интерпретировать в виде таблицы, в которой технологические переделы (ТП) перечислены в строках, а группы оборудования (ГО) — в столбцах (табл. 1).

В данной таблице каждому  $i$ -му ТП,  $i = 1, \dots, n$  соответствуют ячейки  $g_i, j, j = 1, \dots, m_i$ , представляющие собой  $j$ -е ГО. Для наглядного графического представления в ячейки помещены окружности: незакрашенные — незадействованные ГО; закрашенные одним цветом — ГО, задействованные в одной технологической цепочке; закрашенные двумя цветами — ГО, задействованные в двух технологических цепочках.

При оценке конкретного входящего запроса путем семантического анализа выявляется ряд соответствий ТП и ГО. Причем на один и тот же ТП может приходиться несколько разных ГО, например, когда одну и ту же группу операций можно выполнить на универсальных станках, обрабатывающем центре или с применением аддитивных технологий. В результате получают варианты технологических цепочек в виде укрупненных технологических маршрутов. В качестве примера на рис. 2 представлены два варианта технологических цепочек для изготовления одной детали [12].

Из укрупненных технологических маршрутов с учетом прописанных в системе правил технологической последовательности и запретительных комбинаций можно построить ориентированный граф (рис. 1). Его вершины — ГО, соответствующие различным ТП, а ребра — время, необходимое для выполнения заложенных в маршруты технологических переходов. Поскольку каждая из вершин есть комбинация конкретных ТП и ГО, вершинам можно присвоить индексы из двух цифр — по строке  $i$  и столбцу  $j$  (табл. 1).

ГО представляют собой очередное, хотя и ограниченное, пространство возможностей —

<sup>5</sup> Как преодолеть разобщенность между подразделениями? // WRIKE. URL: <https://www.wrike.com/ru/blog/kak-preodolet-razobshennost-mezhdu-podrazdeleniyami/?ysclid=lfhu2hu4yt292884141> (дата обращения: 10.03.2023).

по единицам оборудования (ЕО), находящимся в распоряжении предприятия, а также по кооперации. Каждая ЕО имеет идентификатор, определяющий соответствие  $i$ -му ТП и  $j$ -й ГО. Индекс определяет количество ЕО в данной ячейке ГО. Для упрощенного представления ЕО собственного и субподрядного производства сведены в один список. Таким образом, на каждую из вершин графа будет приходиться по несколько вариантов ЕО — собственного и субподрядного (рис. 2).

В приведенной схеме приходится на каждую из вершин графа варианты единиц оборудования обозначены квадратами и треугольниками с соответствующими индексами. Для упрощения визуализации квадраты обозначают собственные

единицы оборудования, а треугольники — оборудование по кооперации. Такое графическое представление позволяет каждому элементу маршрута присвоить трехзначный индекс, где первая цифра соответствует ТП, вторая — ГО, а третья — конкретной ЕО в собственном парке ли по субподряду. Легко видеть, что рассматриваемый входящий запрос можно выполнить несколькими путями, каждому из которых соответствуют свой технологический маршрут и определенные единицы оборудования. Для каждого из альтернативных вариантов можно построить свои ориентированные графы, вычислить трудоемкость и ресурсоемкость выполнения рассматриваемого заказа и выбрать наиболее приемлемые варианты технологических цепочек [13].

Таблица 1 / Table 1

Пространство возможностей по технологическим переделам и группам оборудования  
Possibility space by process stages and equipment groups

Технологические переделы / Technological subprocesses	Группы оборудования / Groups of equipment								
	1	2	3	4	5	6	7	$j$	$m_i$
1	○	○	●	●	○	○	○	$g_{1,j}$	○
2	○	○	○	○	○	○	○	$g_{2,j}$	○
3	○	●	○	●	○	●	○	$g_{3,j}$	○
4	○	○	○	●	●	○	○	$g_{4,j}$	○
5	○	○	●	○	○	●	○	$g_{5,j}$	○
6	○	○	○	○	○	○	○	$g_{6,j}$	○
$i$	$g_{i,1}$	$g_{i,2}$	$g_{i,3}$	$g_{i,4}$	$g_{i,5}$	$g_{i,6}$	$g_{i,7}$	$g_{i,j}$	$g_{i,m_j}$
$n$	○	○	○	○	○	○	○	$g_{n,j}$	○

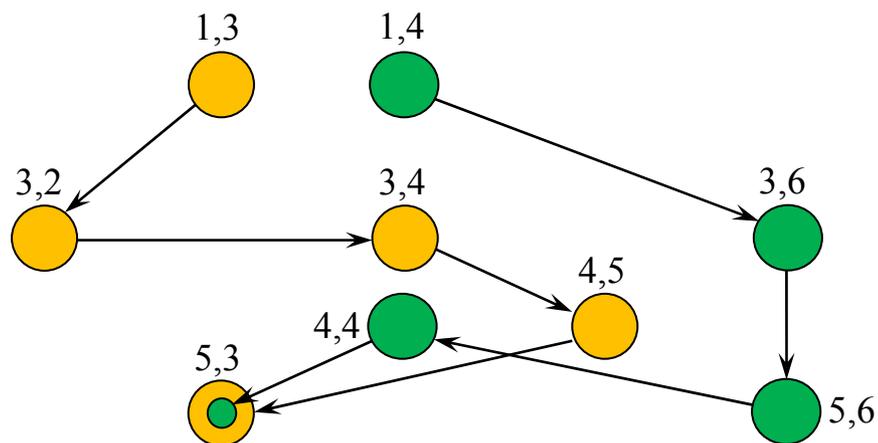
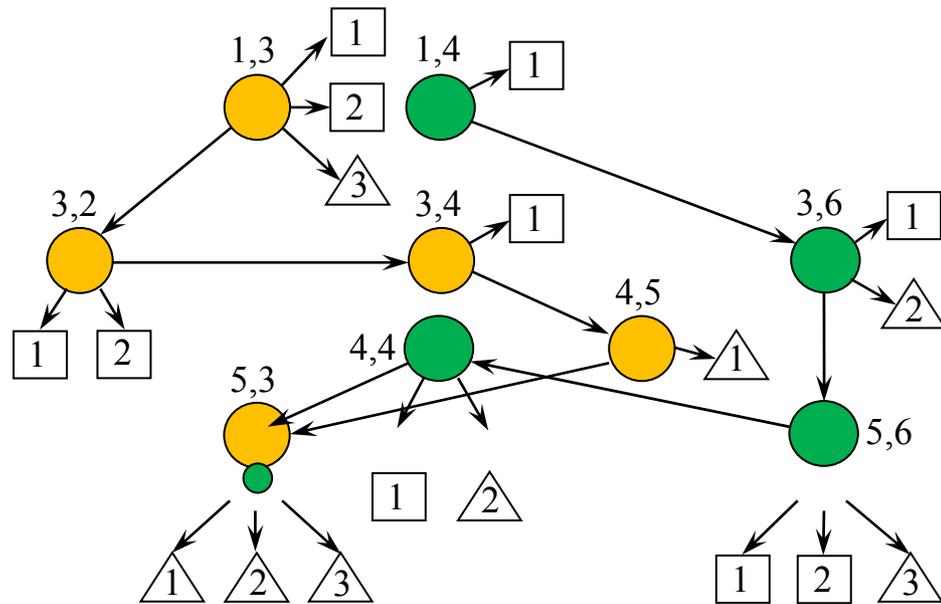


Рис. 1. Ориентированные графы укрупненных технологических маршрутов в соответствии с привязками к технологическим переделам и группам оборудования

Figure 1. Oriented graphs of consolidated process routes according to links to process stages and equipment groups



**Рис. 2.** Ориентированные графы укрупненных технологических маршрутов с указанием конкретных единиц оборудования, имеющихся в распоряжении предприятия (□) или по кооперации (△)  
**Figure 2.** Orientation graphs of consolidated process routes, indicating specific pieces of equipment available to the company (□) or by cooperation (△)

При работе с большой номенклатурой технологически сложных изделий, изготовление которых предполагает тысячи различных операций, размерность задачи вырастает до таких масштабов, что решение ее силами одного специалиста или даже их группы в короткие сроки не представляется возможным. Именно поэтому укрупненное маршрутирование технологических процессов и оценка трудоемкости должны быть автоматизированы с помощью специального аппаратного средства. Это должна быть платформа, содержащая в себе информацию об имеющемся оборудовании, его параметрах, разрешенных и запрещенных технологических комбинациях и др. Система должна аккумулировать информацию по ранее оцененным и выполненным заказам — как касательно технологических цепочек, так и коммерческой эффективности. Более того, в систему следует вносить сведения, привязанные к коммерческим показателям, даже применительно к пилотным проектам и опытным разработкам. Накапливая все больше информации, система должна работать с ней, выявляя закономерности, определяя наиболее востребованную информацию и наиболее удачные подходы и ранжируя сведения, долгое время не востребованные.

По мере появления новых технологий и оборудования в устоявшиеся технологические цепочки должны вноситься изменения, чтобы повышать их эффективность и актуальность. В противном случае сохраняемые десятилетиями технологические цепочки превращаются в нечто аналогичное устаревшим ГОСТам — применяющимся документам, все менее соответствующим технологической действительности. Так, появление аддитивных технологий уже сегодня может рассматриваться как альтернатива традиционному подходу в производстве газовых турбин. В некоторых случаях их применение способнократно сократить стоимость и время выполнения работ.

## 5. Применение искусственных нейронных сетей

Что касается обучаемости системы, то большее значение имеет обеспечение ее способности не только аккумулировать данные по обработанным запросам и выполненным заказам, но и выстраивать ассоциативные связи между ними. Кроме того, система должна распознавать в новых управленческих ситуациях (входящих запро-

сах) своего рода прецеденты по степени их сходства с уже принимавшимися конструкторскими, технологическими и управленческими решениями. Для этого системе требуется интегрирующий все процессы и данные блок управления, обеспечивающий также работу ассоциативной памяти.

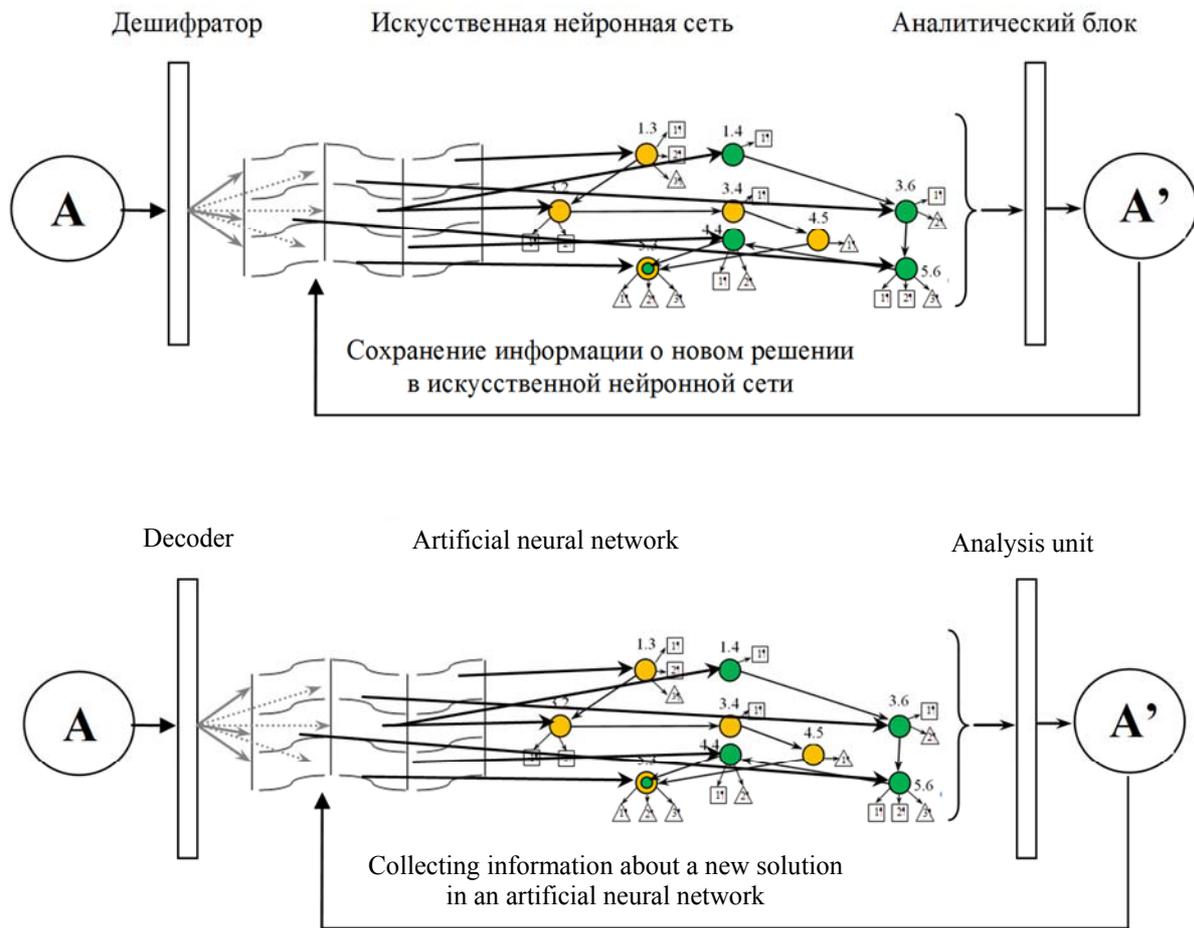
Для достижения таких целей в различных областях управления практикуется применение нейронных сетей. Именно искусственные нейронные сети предлагается применять в качестве средства обучаемости системы и распознавания управленческих ситуаций. При решении этой задачи необходимо также понимать, что множество данных, с которыми приходится работать в этом случае, — нечеткое, и искусственная нейронная сеть должна быть способна с таким множеством работать. Детальный алгоритм работы нейронных сетей применительно к обеспечению робастной работы системы менеджмента качества (СМК) подробно описан исследователями по профильному направлению и с каждым годом совершенствуется, повышая круг задач, которые можно решать с помощью искусственных нейронных сетей [13].

Предлагаемое решение с использованием искусственных нейронных сетей для производственной системы предприятия и СМК может выглядеть следующим образом. Систему предприятия, подобно мозгу человека, можно поделить на центры, отвечающие за определенные активности или, в нашем случае, технологические переделы и вспомогательные операции. Каждый из таких центров, в свою очередь, делится на участки, соответствующие иерархическому делению, спускаясь до искусственных нейронов, отвечающих за конкретную операцию. Каждый искусственный нейрон должен содержать в себе дискретный набор реакций и команд на входящие сигналы в соответствии со значениями диапазона. Так, любую управленческую ситуацию в среде предприятия можно рассматривать в качестве сигнала — как рассматривается входящая информация в нейронной сети. Этот сигнал содержит в себе определенный набор информации, отреагировать на которую и должна система после ее прохождения через нейронную сеть. Таким образом, входящий сигнал необходимо дешифровать или разделить на составляющие. На каждую составляющую сигнала в нейронной сети должен быть предусмотрен соответствующий центр, спо-

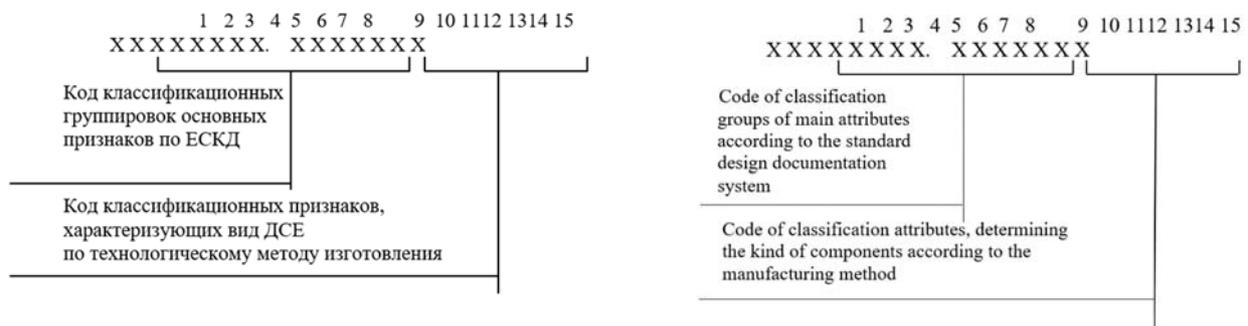
собный обработать приходящийся на него элемент сигнала и выдать соответствующую команду или реакцию. Такое распределение элементов сигнала по соответствующим участкам нейронной сети может работать по принципу ассоциативной памяти — когда сепаратор сигнала распознает, на каком из участков нейронной сети приходится данная часть сигнала. При этом, как и механизм ассоциативной памяти, этот узел системы должен быть обучаем, чтобы с учетом накапливаемого опыта системы такое распределение становилось все более точным. Для этого потребуется определенный модуль памяти, где такая информация будет накапливаться и структурироваться.

Затем, после распределения на центры или участки сети, составные элементы сигналов таким же образом должны распределиться по соответствующим искусственным нейронам — конечным звеньям сети. Здесь, в зависимости от заданного алгоритма, привязанного к диапазону сигнала, нейрон выдаст команду или реакцию, наиболее соответствующую данному элементу сигнала, то есть управленческой ситуации. По совокупности таких команд или реакций от отдельных нейронов и участков сети система — нейронная сеть — выведет общее решение, которое можно будет рекомендовать к принятию или принять автоматически. При этом в случае обнаружения недостатка в искусственных нейронах по тем или иным параметрам сигналов, ранее не отраженных, система может создать новые нейроны, а затем — их группы, чтобы улавливать новый диапазон сигналов, соответствующий определенным параметрам сигналов и свойствам системы. Вся эта информация должна накапливаться в блоке памяти системы и регулярно обрабатываться, чтобы можно было обеспечить обучаемость. В этом случае нейронная сеть станет самоорганизующейся системой, по структуре подобной картам Кохонена. Графически принцип работы такой системы применительно к рассматриваемому примеру представлен на рис. 3.

Как видно из схемы (рис. 4), в искусственной нейронной сети на каждый технологический передел (ТП) существует свой центр, в котором собирается информация о соответствующих группах оборудования (ГО), имеющихся в наличии и доступных по кооперации, а также данные о применимости к тем или иным материалам, деталям



**Рис. 3.** Алгоритм оценки входящего запроса по формированию технологических решений:  
 A — входящий запрос, A' — технологическое решение по входящему запросу  
**Figure 3.** Algorithm for assessing an incoming request to form a technological solution:  
 A — incoming request, A' — technological solution to the incoming request



**Рис. 4.** Структура кортежа данных ДСЕ в виде конструктивно-технологического кода

**Figure 4.** Structure of the component's data tuple as a design-engineering code

и сферам применения. В центрах искусственной нейронной сети также собирается информация о ТП и ГО, реализующих альтернативные технологии. На основании этих данных строится вариативное пространство описанных ранее графов. Аналитический блок сравнивает предложенные искусственной нейронной сетью варианты, оценивает их по критериям времени, трудоемкости, стоимости и выдает наиболее подходящее технологическое решение по заданным параметрам. В случае, если решение уникально и не встречалось ранее, данные о нем заносятся в банк знаний искусственной нейронной сети в соответствии с ее центрами, выполняя тем самым задачу по самообучению системы [14; 15]

Реализация на практике рассматриваемой концепции ускоренной обработки входящих запросов путем укрупненной оценки трудоемкости изготовления изделий по их конструкторско-технологическим признакам предполагает создание интегрированного аппаратного решения. Отдельные компоненты предлагаемого решения, их теоретическая база и возможности практической реализации на протяжении долгого времени изучаются российскими и зарубежными учеными. Некоторые подходы уже успешно реализованы в рамках программных продуктов или их выход на рынок ожидается в скором будущем. Тем не менее еще не создано интегрированное аппаратное решение, позволяющее мгновенно проанализировать запрос на изготовление машиностроительного изделия и предложить несколько предприятий отрасли, технически способных выполнить рассматриваемый заказ и обеспечить требуемый уровень качества в указанном временном и ценовом диапазоне.

## 6. Обзор актуальных подходов

Ускоренная оценка трудоемкости изделий по конструкторско-технологическим признакам рассматривалась в начале и середине 2000-х гг. исследователями Ижевского государственного технического университета А.И. Коршуновым, Е.В. Решетниковым и В.А. Кутергиным. В рамках исследований по автоматизации и управлению технологическими процессами и производствами в машиностроении А.И. Коршунов предлагает опираться на теорию конструкционно-технологической сложности для создания структурно-иерархической модели изделия и автома-

тизированной оценки трудоемкости ее изготовления на ее основе. Е.В. Решетников предлагает использовать нейросеть, способную производить геометрический анализ изделий и декомпозицию деталей на основе САД-моделей для автоматизированного расчета трудоемкости изготовления. В.А. Кутергин в своих работах продолжает концепцию применения теории конструкционно-технологической сложности, что также нашло практическое применение в программных продуктах, разработанных компанией BFG Group и имеющих Государственную регистрацию в Роспатент как «Программа для ЭВМ BFG СМТ (Технология поддержки принятия решений) номер свидетельства: 2018662164» и «Программа для ЭВМ BFG QRM (Технология управления производственной системой предприятия), номер свидетельства: 2018662311». Указанные программные средства позволяют создать имитационную модель производства и на ее основе делать прогнозы, анализировать возможные изменения производственной системы в ответ на внешние факторы, оптимизировать технологический процесс, обеспечивать внутрицеховую диспетчеризацию и проводить реинжиниринг производства. Для работы такой системы необходимы входные данные о номенклатуре выпускаемой продукции и возможных спецификациях, о парке оборудования и кадровых ресурсах, о технологических маршрутах с привязкой к оборудованию и о продолжительности операций. В результате система способна предлагать такие управленческие решения, которые позволят повысить производительность, снизить издержки и ускорить производственный цикл [16–18].

Лидерами российского рынка аппаратных средств для оптимизации производственных процессов, имитационного моделирования и проектирования технологических процессов выступают компании «АСКОН» (продукты «ВЕРТИКАЛЬ» и «КОМПАС») и «СПРУТ-Технология». Эти системы также позволяют повысить производительность, снизить издержки и сократить время производственных циклов, поэтому широко применяются на предприятиях с серийным производством и однородными технологическими процессами [19].

Наиболее фундаментально подход к оптимизации производства методом имитационного моделирования обосновывается учеными Санкт-Петербургского государственного политехничес-

кого университета им. Петра Великого под руководством А.И. Боровкова и реализуется на практике силами Центра компьютерного инжиниринга СПбПУ «CompMechLab». С помощью методов математического моделирования и графической визуализации А.И. Боровков предлагает создание «цифровых двойников» предприятий и «цифровых фабрик будущего», которые позволят моделировать, прогнозировать, оптимизировать и планировать производственные процессы в короткие сроки, с высокой точностью и минимальными затратами ресурсов [20].

### **7. Критика существующих подходов и концептуальное решение**

В случае со специальным, общим и энергетическим машиностроением применение вышеупомянутых систем часто затруднено отсутствием технологического процесса, разработанного под конкретное предприятие. До решения задачи оптимизации сначала необходимо разработать хотя бы предварительный технологический процесс, который позволит обработать входящий запрос и подготовить технико-коммерческое предложение. Эти действия затратны по времени и кадровым ресурсам, что зачастую приводит к проблемам, описанным в начале статьи.

Для того чтобы автоматически определить принципиальную возможность изготовления изделия и разработать несколько альтернативных технологических маршрутов декомпозиция ДСЕ на геометрические примитивы, должна быть каким-то образом формализована в кортеж данных для проведения семантического анализа и сопоставления параметров ДСЕ с параметрами имеющегося оборудования. Сделать это можно с помощью расширенного классификатора ЕСКД, в который дополнительно включены параметры, характеризующие ДСЕ по технологическому методу изготовления<sup>6</sup>.

Полученный конструктивно-технологический код ДСЕ можно использовать для проведения семантического анализа по следующей логике, представленной на рис. 5.

Результаты семантического анализа параметров ДСЕ и производственных мощностей позволяют не только найти оптимальное решение для конкретного заказа, но и становятся базой для дальнейшего совершенствования технологического процесса и машинного обучения с использованием искусственных нейронных систем. В значительной степени реализация стратегии «Индустрия 4.0» базируется на создании процессов во всей производственной системе, а не на управлении отдельными единицами оборудования. Методом «наказаний и поощрений» единицы оборудования обучаются поиску таких комбинаций, которые способствуют достижению целевых показателей для всей производственной системы, а не для отдельных ее элементов. Для этого искусственная нейросеть позволяет предсказывать реакцию всей системы на предполагаемые действия с непрерывным повышением достоверности оценок. Одна из ведущих школ, занимающихся развитием машинного обучения с применением искусственных нейронных сетей, — Институт корпоративной кибернетики (Institut für Unternehmenskybernetik e.V.) в г. Аахен, Германия. Совместно с Союзом машиностроителей Германии (VDMA e.V.) Институт разрабатывает концепции управления производством с элементами искусственного интеллекта для различных отраслей в рамках стратегии «Индустрия 4.0». В машинном обучении Институт выделяет три подхода — контролируемое обучение с учителем (supervised learning), неконтролируемое обучение без учителя (unsupervised learning) и обучение с подкреплением (reinforcement learning) на базе взаимодействия машин со внешней средой с применением метода поощрений и наказаний. Основной упор в развитии механизмов машинного обучения делается на третий подход с целью внедрения этих механизмов на существующих производствах. Это требует глубокой интеграции в существующую производственную систему на физическом уровне посредством датчиков и коммуникационных устройств, позволяющих получать «цифровой двойник» производственной системы в реальном времени и предсказывать изменения ее состояния<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Машиностроение. 2020. 568 с.

<sup>7</sup> См.: Institut für Unternehmenskybernetik // Institut für Unternehmenskybernetike. V. URL: <https://ifu.rwth-aachen.de/> (accessed: 10.02.2023); Leitfaden Selbstlernende Produktionsprozesse. URL: <https://www.vdma.org/documents/34570/0/Leitfaden%20Selbstlernende%20Produktionsprozesse%20-%20KI.pdf/6eb1e986-f6dd-ec1c-6faf-515244bbf35f> (accessed: 10.02.2023).

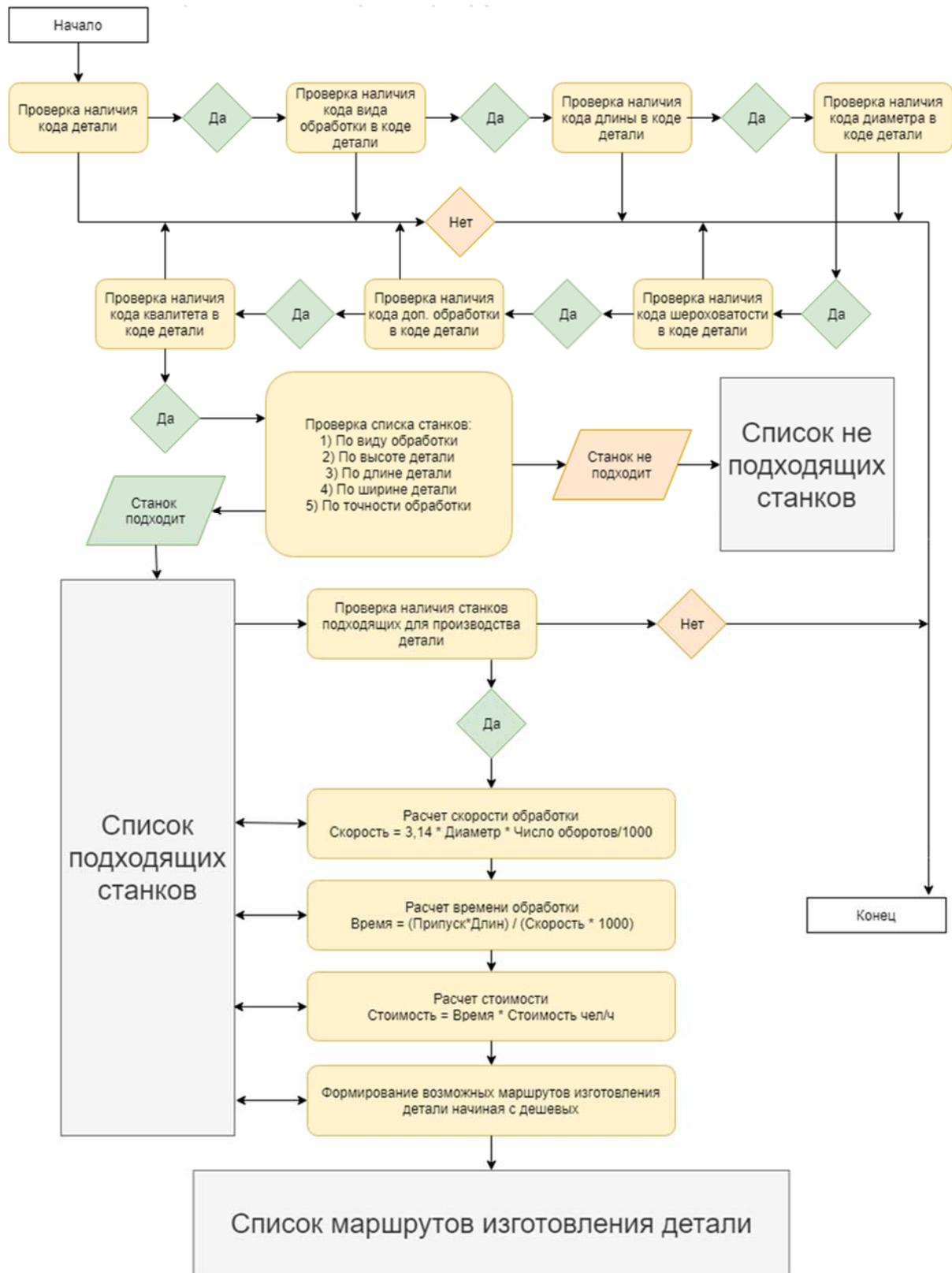


Рис. 5. Процесс подбора маршрутов изготовления детали



Для решения проблем, сформулированных в начале статьи, обучение с подкреплением будет необходимо после построения аппаратного средства, позволяющего производить мгновенный и достоверный семантический анализ входящего запроса, строить возможные технологические маршруты и анализировать их в контексте накопленного отраслевого опыта. Для этого необходимо широкое применение первых двух подходов, в том числе в отношении накопленного и нецифровизованного опыта прошлых лет. Кроме того, для обеспечения максимальной скорости работы предлагаемой системы необходимо решение, позволяющее автоматически формировать конструктивно-технологический код детали на основе трехмерной модели, исполнительного чертежа, а в перспективе — графического изображения с указанием размеров и параметров изделия. Такая перспектива необходима для работы в условиях, когда к подготовке запроса невозможно привлечь квалифицированного инженера, например, в автономных условиях эксплуатации или когда речь идет о необходимости срочной замены изделий, произведенных десятки лет назад, на которые не осталось технической документации. В таких случаях необходим аппаратный инструмент, позволяющий с помощью лазерных лучей и рентгеновского излучения установить размеры и геометрическую форму изделия, а с помощью средств неразрушающего контроля определить материал, из которого оно изготовлено.

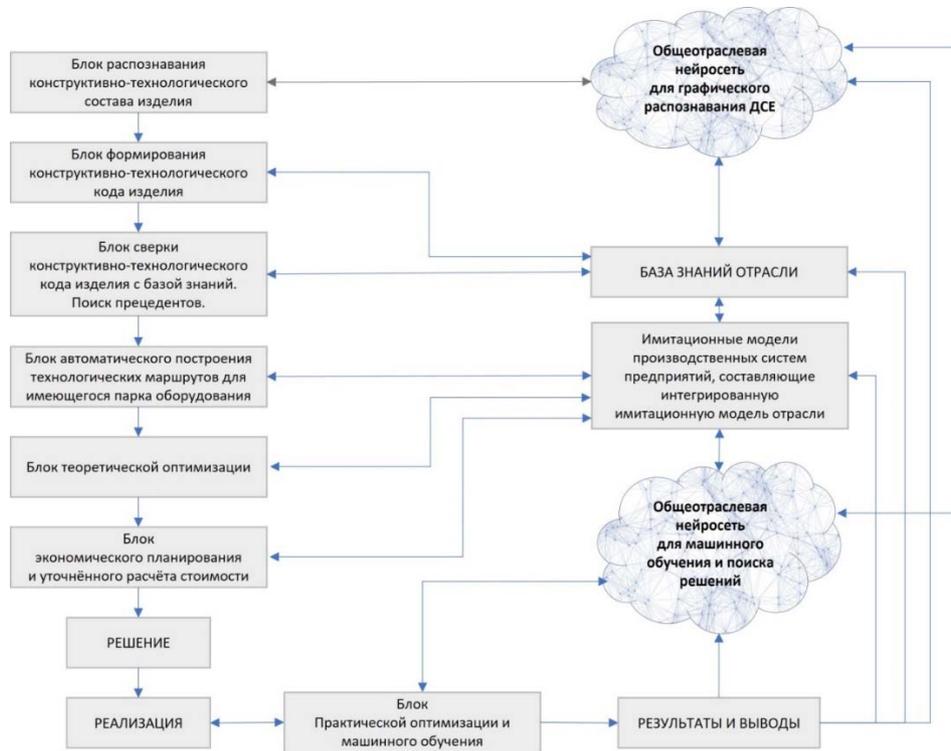
На сегодняшний день применение искусственных нейронных систем в инженерном деле изучается не только в направлении машинного обучения, оптимизации и имитационного моделирования, но и в направлении распознавания графических объектов — Optical Character Recognition (OCR). Практическое применение нейросетей в распознавании предметов, лиц, речи и голосов достигло больших успехов и вышло на массовый уровень, но решение задачи распознавания конструктивно-технологического состава ДСЕ, достаточного для автоматического построения технологического процесса, существенно сложнее. Существующие нейросети уже способны распознавать бумажные чертежи, выделять размерные линии, стрелки и заданные параметры,

и строить по имеющимся данным трехмерную модель. По трехмерной модели ДСЕ нейросеть уже способна построить ее информационную модель — первые наработки в этом направлении уже сделаны группой инженеров из Федерального технического университета Цюриха, Швейцария — на базе экспериментальной компании W24 Service GmbH в Мюнхене, Германия. Для этого опыта в создании аппаратного средства для решения обозначенных в начале статьи проблем необходимо создать программный инструмент, позволяющий автоматически формировать конструктивно-технологический код ДСЕ. Это позволит мгновенно строить технологические маршруты и сверять с базой накопленных знаний, решать задачу оптимизации и предлагать оптимальный путь выполнения заказа. В ходе выполнения заказа инструменты машинного обучения позволят оптимизировать процесс в реальном времени и пополнять базу знания предприятия и отрасли<sup>8</sup> [21].

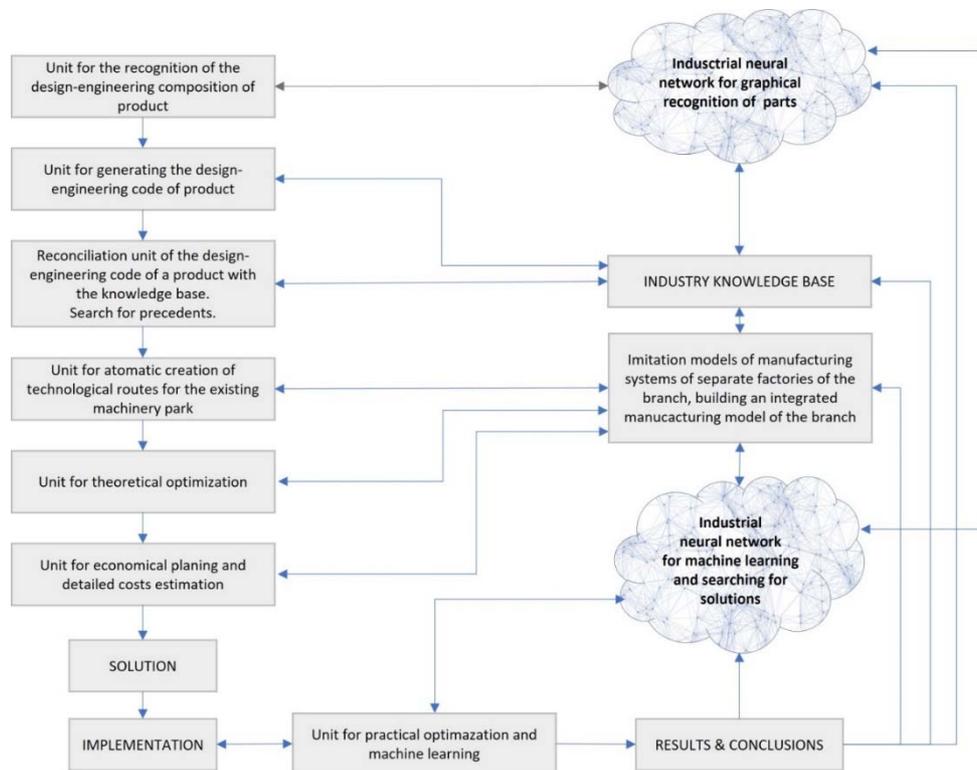
Предлагаемое аппаратное решение должно стать инструментом, который позволит выстроить структуру управления критически важной отраслью по схеме «заказчик и исполнители», где заказчиком выступает государство в лице министерства, федерального агентства, госкорпорации или другой структуры, а исполнителями — все предприятия отрасли, работающие в рамках данной системы. Такой подход обеспечит прозрачность, управляемость и надежность отрасли для заказчика в лице государства, снизит риски субъективных оценок, а также обеспечит предприятия регулярными заказами внутри отрасли при условии поддержания работоспособности производственных систем и непрерывного улучшения.

Внедрение системы должно предполагать отладку на мощностях первого опытного предприятия с последующим расширением на другие предприятия отрасли по мере устранения ошибок и уязвимых мест. Для внедрения необходима команда из специалистов трех типов — экспертов по производству, экспертов в области построения нейронных сетей и машинного обучения, а также инженеров-программистов. Поскольку система должна быть отраслевой, ее внедрением, отладкой и обслуживанием должна заниматься

<sup>8</sup> Automatically Check In-coming RFQs // W24 Service GmbH: URL: <https://werk24.io/product/feasibility-analysis-of-technical-drawings> (accessed: 10.02.2023).



**Рис. 6.** Предполагаемая архитектура отраслевой системы автоматической обработки и распределения заказов с применением семантического анализа и искусственных нейросетей



**Figure 6.** The proposed architecture of an industry-wide automatic order processing and distribution system using semantic analysis and artificial neural networks

одна команда инженеров, работающая на единого заказчика в лице государственной структуры. По мере успешного внедрения команда инженеров будет перемещаться с одного предприятия на другое, пока не будут охвачены все предприятия отрасли. Управление системой должно осуществляться из единого центра, но не в режиме вертикально интегрированной структуры, а в качестве оператора, которому доступны функции контроля на всех уровнях. Перспективная архитектура предлагаемой системы представлена на рис. 6.

## Заключение

Несмотря на растущую цифровизацию экономики и появление средств автоматизации обработки запросов, проектирования технологических процессов и машинного обучения, отношения заказчиков и исполнителей в машиностроительной отрасли сохраняют субъективный характер. Имеющиеся программные средства позволяют повысить эффективность технологических процессов, снизить издержки и сократить время выполнения заказов, но не являются частью механизма принятия решения о заключении контрактов. Применяемый в государственных закупках Федеральный закон № 223<sup>9</sup> предполагает возможность участия в торгах любых поставщиков на условиях свободного рынка. В случае соответствия формальным критериям отбора и подачи коммерческого предложения с конкурентной ценой поставщиком имеет право стать любая организация. Соответствие предлагаемой цены и сроков поставки реальным возможностям предприятия — участника государственных закупок сложно проверить, и возникает риск срыва контрактных обязательств. Несоответствие поставляемых товаров и услуг требуемым параметрам приводит к невозможности обеспечения тех свойств продукции, которые необходимы для ее полноценного применения по назначению. Эта невозможность обеспечения качества продукции ограничивает технологические возможности целых отраслей, вынуждает импортировать критически важные изделия и ставит под угрозу технологический суверенитет государства.

Применение предложенного в статье решения для автоматизированного выбора подрядчи-

ков в машиностроительной отрасли позволит сократить упомянутые риски, но может потребовать отступления от механизма свободного рынка в пользу повышения надежности работы критически важных отраслей. Для этого может понадобиться создание единых отраслевых управляющих структур, в которые предприятия отрасли будут входить в качестве структурных подразделений. В таком случае отбор исполнителей можно будет проводить автоматически внутри единой структуры без проведения тендеров по Федеральному закону № 223.

Предложенный в статье подход, описанная концепция и логическая схема могут использоваться для построения многоуровневого программного инструмента автоматизированного внутриотраслевого управления.

## Список литературы

1. Миллер А.С. Электролиз доверия // Россия в глобальной политике. 2020. URL: <https://globalaffairs.ru/articles/elektroliz-doveriya/?ysclid=le5lkzogow692554795> (дата обращения: 10.02.2023)
2. Миллер А.С. Генерация лидерства // Изборский клуб. 2022. № 2–3(100–101). С. 90–101. URL: [https://izborsk-club.ru/magazine\\_files/2022\\_02.pdf](https://izborsk-club.ru/magazine_files/2022_02.pdf) (дата обращения: 10.02.2023)
3. Акулова Е. Директивное ценообразование: когда государство вмешивается в ценовую политику компании // Генеральный директор. Персональный журнал руководителя. URL: <https://www.gd.ru/articles/12032-direktivnoe-tsenoobrazovanie?ysclid=lf3841463r389327728> (дата обращения: 17.03.2023)
4. Годованник Л.Б. Верховный суд запретил Кировскому заводу задерживать поставки турбин для атомных ледоколов // Ведомости Санкт-Петербург. URL: <https://www.vedomosti-spb.ru/business/articles/2022/07/08/930539-verhovnii-sud-zapretil-kirovskomu-zavodu> (дата обращения: 09.02.2023)
5. Шамахов В.А., Ивченко Б.П. Обеспечение национальной безопасности в Арктической зоне Российской Федерации: монография. СПб.: ИПЦ СЗИУ РАН-ХиГС, 2019. 156 с.
6. Евсеев В.И. Экономические, промышленные и социальные системы современной России: состояние и их трансформации (2009–2020 гг.): монографический сборник избранных статей, рецензий, выступлений в СМИ, комментариев. СПб.: Фиарт, 2021. 338 с.

<sup>9</sup> Федеральный закон от 18.07.2011 N 223-ФЗ (ред. от 05.12.2022) «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.04.2023).

7. Васильков Д.В., Тариков И.Я., Миллер А.С. Проблемы оперативного запуска в производство заказов на предприятии под управлением системы менеджмента качества // *Металлообработка*. 2016. № 4 (94). С. 68–71. EDN: XBJSZS

8. Brent G. The Silo Mentality: How To Break Down The Barriers // *FORBES*. URL: <https://www.forbes.com/sites/brentgleeson/2013/10/02/the-silo-mentality-how-to-break-down-the-barriers/?sh=6260a2a8c7e9> (дата обращения: 10.03.2023)

9. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.

10. Бабаев А.В., Растренин Т.О. Беспилотные летательные аппараты. Групповая тактика // *Техника и вооружение*. 2021. № 5. С. 2–12.

11. Леонов А.В., Литвинов Г.А. Применение алгоритма пчелиной колонии BeeAdHoc для маршрутизации в FANET // *Вестник СибГУТИ*. 2018. № 1. С. 85–95.

12. Васильков Д.В., Тариков И.Я., Миллер А.С. Повышение надежности и оперативности производственной технологической системы за счет интеллектуальной оценки запросов с применением механизмов искусственных нейронных сетей // *Металлообработка*. 2017. № 3(99). С. 58–64.

13. Сочнев А.Н. Сети Петри с памятью состояний // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2016. № 9(4). С. 523–528. <https://www.doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-523-528>

14. Поезжалова С.Н., Селивано С.Г., Бородкина О.А., Кузнецова К.С. Рекуррентные нейронные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительного производства // *Вестник УГАТУ*. 2011. Т. 15. № 5(45). С. 36–46.

15. Kohonen T. *Self-Organizing Maps*. Springer Science & Business Media, 2012. 502 p.

16. Кутергин В.А. Инженерные теории с конструктивной точки зрения: множество геометрий и множество моделей искусственных объектов: монография. СПб.: Лань, 2015. 304 с.

17. Решетников Е.В. Разработка подсистемы геометрического анализа детали // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2008. № 1(11). С. 85–87.

18. Якимович Б.А., Коршунов А.И., Кузнецов А.П. Теоретические основы конструктивно-технологической сложности изделий и структур-стратегий производственных систем машиностроения. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2007. 279 с.

19. Евгеньев Г.Б. Российские технологии создания систем класса «Индустрия 4.0». Часть 2 // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 9(702). С. 18–27. <https://www.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-9-18-27>

20. Боровков А.И., Щербина Л.А., Марусева М.В., Рябов Ю.А. Мировая технологическая повестка и

глобальные тенденции развития промышленности в условиях цифровой экономики // *Инновации*. 2018. № 12 (242). С. 34–42.

21. Kim K.-Y., Monplaisir L., Rickli J. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus. Proceedings of FAIM: International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, June 19–23, 2022, Detroit, Michigan, USA, 2023. 414 p.

## References

1. Miller AS. Electrolysis of trust. *Russia in global politics*. 2020. (In Russ.) Available from: <https://globalaffairs.ru/articles/elektroliz-doveriya/?ysclid=le5lkzogow692554795> (accessed: 10.02.2023)

2. Miller AS. Leadership generation. *Izborsky Club*. 2022;2–3(100–101):90–101. (In Russ.) Available from: [https://izborsk-club.ru/magazine\\_files/2022\\_02.pdf](https://izborsk-club.ru/magazine_files/2022_02.pdf) (accessed: 10.02.2023)

3. Akulova E. Directive pricing: when the state intervenes in the pricing policy of the company. *General manager. Personal journal of the manager*. Available from: <https://www.gd.ru/articles/12032-direktivnoe-tsenoobrazovanie?ysclid=lf3841463r389327728> (accessed: 17.03.2023)

4. Godovannik LB. The Supreme Court has banned the Kirov Plant from delaying the supply of turbines for nuclear icebreakers. *Vedomosti Sankt-Peterburg*. Available from: <https://www.vedomosti-spb.ru/business/articles/2022/07/08/930539-verhovnii-sud-zapretil-kirovskomuzavodu> (accessed: 09.02.2023).

5. Shamakhov VA, Ivchenko BP. *Ensuring national security in the Arctic zone of the Russian Federation: monograph*. St. Petersburg: IPCz SZIU RANXiGS Publ.; 2019. (In Russ.)

6. Evseev VI. *Economic, Industrial and Social Systems of Modern Russia: State and Transformations (2009–2020): collection of selected articles, reviews, media publications, comments*. St. Petersburg: Fiart Publ.; 2021. (In Russ.)

7. Vasilkov DV, Tarikov IYa, Miller AS. Problems of expeditious start in production of orders at the enterprise under control of quality management system. *Metalworking*. 2016;4(94):68–71. EDN: XBJSZS

8. Brent G. The Silo Mentality: How To Break Down The Barriers. *Forbes*. 2013. Available from: <https://www.forbes.com/sites/brentgleeson/2013/10/02/the-silo-mentality-how-to-break-down-the-barriers/?sh=6260a2a8c7e9> (accessed: 10.03.2023).

9. Tsetlin M.L. *Research on the theory of automata and modeling of biological systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1969. (In Russ.)

10. Babaev A.V., Rastrenin T.O. Беспилотный летательный аппарат. Групповая тактика. *Техника и вооружение [Equipment and weapons]*. 2021;5:2–12. (In Russ.)

11. Leonov A, Litvinov G. Application of the beehive colony algorithm for routing to fanet. *Vestnik SibGUTI*. 2018;1:85–95. (In Russ.)
12. Vasilkov DV., Tarikov IY, Miller AS. Increase of reliability and efficiency of production technological system at the expense of an intellectual assessment of inquiries with use of mechanisms of artificial neural networks. *Metalworking*. 2017;3(99):58–64. (In Russ.)
13. Sochnev AN. Petri nets with the states memory. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*. 2016;9(4):523–528. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-523-528>
14. Poezjalova SN, Selivanov SG, Borodkina OA, Kuznetsova KS. Recurrent neural networks and optimization methods of technological processes in the automated systems of technological preparation machine-building production. *Vestnik UGATU (Scientific journal of Ufa University of Science and Technology)*. 2011;15(5(45)): 36–46. (In Russ.) Available from: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_18863029\\_88275887.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18863029_88275887.pdf) (accessed: 10.03.2023)
15. Kohonen T. *Self-Organizing Maps*. Springer Science & Business Media, 2012.
16. Kutergin VA. *Engineering theories from a constructive point of view: a set of geometries and a set of models of artificial objects*. St. Petersburg: Lan Publ.; 2015. (In Russ.)
17. Reshetnikov EV. Development of a subsystem for geometric analysis of a part. *Intelligent systems in manufacturing*. 2008;1(11):85–87. (In Russ.)
18. Yakimovich BA, Korshunov AI, Kuznetsov AP. *Theoretical foundations of the structural and technological complexity of products and structural strategies of production systems of mechanical engineering*. Izhevsk: IzhSTU Publ.; 2007. (In Russ.)
19. Eugenev GB. Russian technologies for creation of industry 4.0 systems. Part 2. *BMSTU journal of mechanical engineering*. 2018;9(702):18–27. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-9-18-27>
20. Borovkov AI, Shcherbina LA, Maruseva VM, Ryabov Yu.A. World technology agenda and global industrial trends in the digital economy. *Innovations*. 2018;12(242):34–42. (In Russ.) EDN: VWDZYS
21. Kim K-Y, Monplaisir L, Rickli J. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus. *Proceedings of FAIM: International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, June 19–23, 2022, Detroit, Michigan, USA, 2023.

#### Сведения об авторе

**Миллер Андрей Сергеевич**, генеральный директор Балтик Винд Групп, Гамбург, Германия; ORCID: 0009-0003-3883-9557; E-mail: [a.miller@baltic-wind.de](mailto:a.miller@baltic-wind.de)

#### About the author

**Andrei S. Miller**, General Manager, Baltic Wind Group, Hamburg, Germany; ORCID: 0009-0003-3883-9557; E-mail: [a.miller@baltic-wind.de](mailto:a.miller@baltic-wind.de)