



## СТРАТЕГИЯ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

**Хисамутдинов Р. М. ORCID ID 0000-0002-5107-4419,**

**Рябов Е. А. ORCID ID 0000-0002-7598-8717,**

**Ступко В. Б. ORCID ID 0000-0003-4885-0584**

*Набережночелнинский институт (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Набережные Челны, Российская Федерация, e-mail: vbstupko@kpfu.ru*

Современные предприятия автомобилестроения функционируют в условиях высокой номенклатуры (широкого ассортимента) режущего и вспомогательного инструмента, роста требований к точности обработки и цифровизации производственных систем, что существенно усложняет процессы технологической подготовки производства и управления инструментальным хозяйством. Целью настоящей статьи является разработка и научное обоснование формализованной организационно-технической модели системы инструментальнообеспечения, ориентированной на интеграцию цифровых средств проектирования, автоматизированного складского учета с учетом экономической оценки технологических решений на основе показателя «стоимость на деталь». В качестве материалов и методов использован системный анализ жизненного цикла режущего инструмента, эмпирические модели стойкости инструмента, оптимизационные методы выбора режимов резания и модели управления запасами, а также концепция цифрового двойника инструмента, интегрированная с автоматизированной системой проектирования металлорежущего инструмента и системами планирования ресурсов предприятия. В результате авторами сформирована формализованная модель, связывающая параметры технологического режима, стойкость инструмента, логистические и эксплуатационные затраты с интегральным показателем экономической эффективности. Применение разработанного подхода позволяет снизить значение стоимости на деталь за счет повышения оборачиваемости инструмента, сокращения времени переналадки оборудования и оптимизации складских запасов. Полученные выводы подтвердили целесообразность перехода к сервисной модели инструментальнообеспечения и внедрения цифровых инструментальных платформ как одного из ключевых факторов повышения устойчивости и конкурентоспособности машиностроительных предприятий в условиях индустриальной цифровизации.

**Ключевые слова:** инструментальнообеспечение, режущий инструмент, система автоматизированного проектирования, технологическая подготовка производства, жизненный цикл инструмента, индустрия 4.0, цифровое производство

## THE STRATEGY OF INSTRUMENT SUPPORT FOR AUTOMOTIVE ENTERPRISES IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION OF PRODUCTION SYSTEMS

**Khislamutdinov R. M. ORCID ID 0000-0002-5107-4419,**

**Ryabov E. A. ORCID ID 0000-0002-7598-8717,**

**Stupko V. B. ORCID ID 0000-0003-4885-0584**

*Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Kazan (Volga Region) Federal University", Naberezhnye Chelny, Russian Federation, e-mail: vbstupko@kpfu.ru*

Modern automotive enterprises operate in conditions of a high range (wide range) of cutting and auxiliary tools, increasing demands on processing accuracy and digitization of production systems, which significantly complicates the processes of technological preparation of production and management of the tool industry. The purpose of this article is to develop and scientifically substantiate a formalized organizational and technical model of a tool support system focused on the integration of digital design tools, automated warehouse accounting, taking into account the economic assessment of technological solutions based on the "cost per part" indicator. The materials and methods used are a systematic analysis of the life cycle of a cutting tool, empirical models of tool durability, optimization methods for selecting cutting modes and inventory management models, as well as the concept of a digital tool twin integrated with an automated metal-cutting tool design system and enterprise resource planning systems. As a result, the authors have formed a formalized model linking the parameters of the technological regime, tool durability, logistical and operational costs with an integral indicator of economic efficiency. The application of the developed approach makes it possible to reduce the value of the cost per part by increasing tool turnover, reducing equipment changeover time and optimizing inventory. The findings confirmed the expediency of switching to a service model of tool provision and the introduction of digital tool platforms as one of the key factors in increasing the sustainability and competitiveness of machine-building enterprises in the context of industrial digitalization.

**Keywords:** tool support, cutting tool, automated design system, technological preparation of production, tool lifecycle, industry 4.0, digital production

### Введение

Современные предприятия автомобилестроения функционируют в условиях потребности широкой номенклатуры режущего и вспомогательного инструмента, что обусловлено усложнением конструкций изделий, повышением требований к точности и качеству обработки, а также ростом уровня автоматизации производственных систем. Например, при изготовлении двояких частей трансмиссий и элементов ходовой части количество наименований применяемого инструмента может достигать десятков тысяч, что существенно усложняет процессы планирования, снабжения и эксплуатации инструментального хозяйства. Для целевого обеспечения машиностроительных производств абразивным, алмазным, твердосплавным, стандартным и специальным инструментом построены инструментальные заводы и производства. Разработаны программы технологической кооперации в изготовлении нового поколения высокопроизводительного инструмента. В итоге за последние годы достигнуты ощутимые снижения удельных затрат потребления инструмента [1].

Необходимо отметить, что в условиях цифровой трансформации промышленности и широкого внедрения концепций «Индустрии 4.0» особое значение приобретает интеграция процессов инструментального обеспечения в общее информационное пространство предприятия, включающее системы

автоматизированного проектирования, управления производством и логистики [2; 3]. Современные исследования показывают, что уровень производительности и устойчивости технологических процессов в значительной степени определяется не только параметрами оборудования, но и характеристиками режущего инструмента, его стойкостью, качеством восстановления и доступностью в производственном цикле [4; 5].

Это связано с тем, что уровень производительности и качество обработки, достигаемые сегодня, определяются в первую очередь свойствами инструмента. При этом значительно более капиталоемкий элемент технологической системы, оборудование, рассматривается с точки зрения наличия или отсутствия технологических ограничений на применяемый инструмент (по частоте вращения, мощности приводов и т. д.).

Цифровизация цепочек поставок и внедрение интеллектуальных систем управления ресурсами способствуют формированию новых моделей снабжения и эксплуатации инструмента, ориентированных на снижение совокупных затрат и повышение прозрачности процессов [2; 5]. В этой связи актуальной задачей является разработка организационно-технических моделей инструментального обеспечения, обеспечивающих комплексное управление жизненным циклом инструмента и экономическую обоснованность технологических решений (рис. 1).

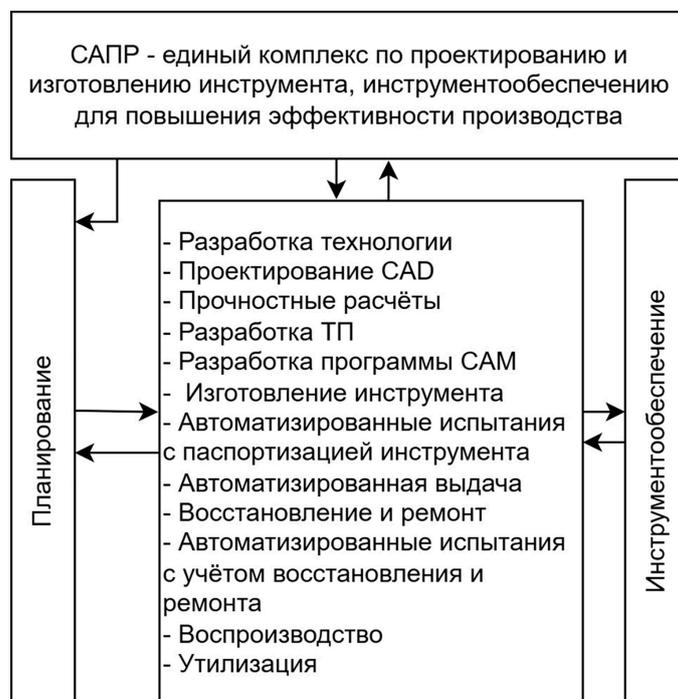


Рис. 1. Информационный комплекс инструментального обеспечения

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В настоящих условиях предприятия для достижения этих основополагающих целей в рамках системы инструментального обеспечения реализуют организационно-технический и технологический комплекс. Система инструментального обеспечения призвана обеспечивать полноценную эксплуатацию и обслуживание инструмента на протяжении всего его жизненного цикла. При этом важно соблюсти два принципа:

- Комплексность. Успешным может быть только решение всего комплекса задач инструментального обеспечения.

- Ответственность. Обязательно должен существовать единый центр ответственности, обеспечивающий коммуникативные, отчетные, контрольные функции во взаимоотношениях с заказчиком.

Для разработки организационно-технической модели необходимо решить следующие задачи: анализ роли инструментального обеспечения в структуре технологической подготовки производства; формирование принципов комплексности и центра ответственности в управлении инструментальным хозяйством; разработка методических подходов к выбору инструмента, в том числе оценке экономической эффективности технологических решений; унификация и стандартизация технологической оснастки и инструмента за счет унификации технологических проектных решений в системе автоматизированного проектирования металлорежущего инструмента (САПР); оценка производственных и экономических эффектов внедрения автоматизированных систем проектирования и управления оборотом инструмента.

**Цель исследования** – разработка и научное обоснование формализованной организационно-технической модели системы инструментального обеспечения, ориентированной на интеграцию цифровых средств проектирования, автоматизированного складского учета с экономической оценкой технологических решений на основе показателя «стоимость на деталь».

#### **Материал и методы исследования**

В качестве методологической основы принят системный подход к управлению жизненным циклом инструмента, включающий стадии проектирования, выбора, закупки или изготовления, эксплуатации, дефектовки, восстановления и утилизации. Данный подход соответствует современным концепциям устойчивого и цифрового производства, предполагающим непрерывный сбор и анализ данных о состоянии технологических процессов и ресурсе инструмента [4; 6; 3].

Для структурирования функций инструментального обеспечения используется функционально-иерархическая модель, позволяющая выделить ключевые подсистемы: проектирование и выбор инструмента, складская логистика, эксплуатация и контроль, восстановление и экономическая оценка [7; 8].

Создание собственного технологического подразделения, включающего в себя конструкторов по инструменту и оснастке, а также аналитиков по внедрению прогрессивной технологии и инструмента, становится насущной необходимостью для полноценного выполнения функций инструментального обеспечения, позволяет сконцентрировать в одних руках ответственность за технологическое обеспечение производства.

При этом предприятия, выпускающие основную товарную продукцию (двигатели, грузовые автомобили, запасные части), получили возможность сконцентрировать усилия (другими словами, перенести центр затрат) на своей ключевой компетенции, на потоке создания ценности. Вспомогательные функции при этом потребляются ими в качестве услуги, а не производятся самостоятельно. При этом производство этих функций становится ключевой компетенцией поставщика услуги инструментального обеспечения. Суммарное качество технологической подготовки производства при этом возрастает.

Разработанная авторами модель (рис. 2) основывается на принципе центра ответственности, в рамках которого специализированное инструментальное подразделение или инструментальный завод осуществляет управление всеми стадиями оборота инструмента. В его функции входят:

- разработка технических требований к инструментальным средствам на стадии проектирования технологий обработки;

- согласование и сравнительная экономическая оценка альтернативных технологических решений;

- выбор, изготовление или закупка инструмента с учетом унификации и стандартизации номенклатуры;

- организация многоуровневого складского учета и автоматизированной выдачи инструмента;

- контроль эксплуатации, дефектовка и восстановление режущих свойств инструмента.

Представленная модель позволяет рассматривать инструментальное обеспечение как сервисную функцию, интегрированную в поток создания ценности основного производства, что соответствует современным подходам к управлению производственными системами [5; 9].

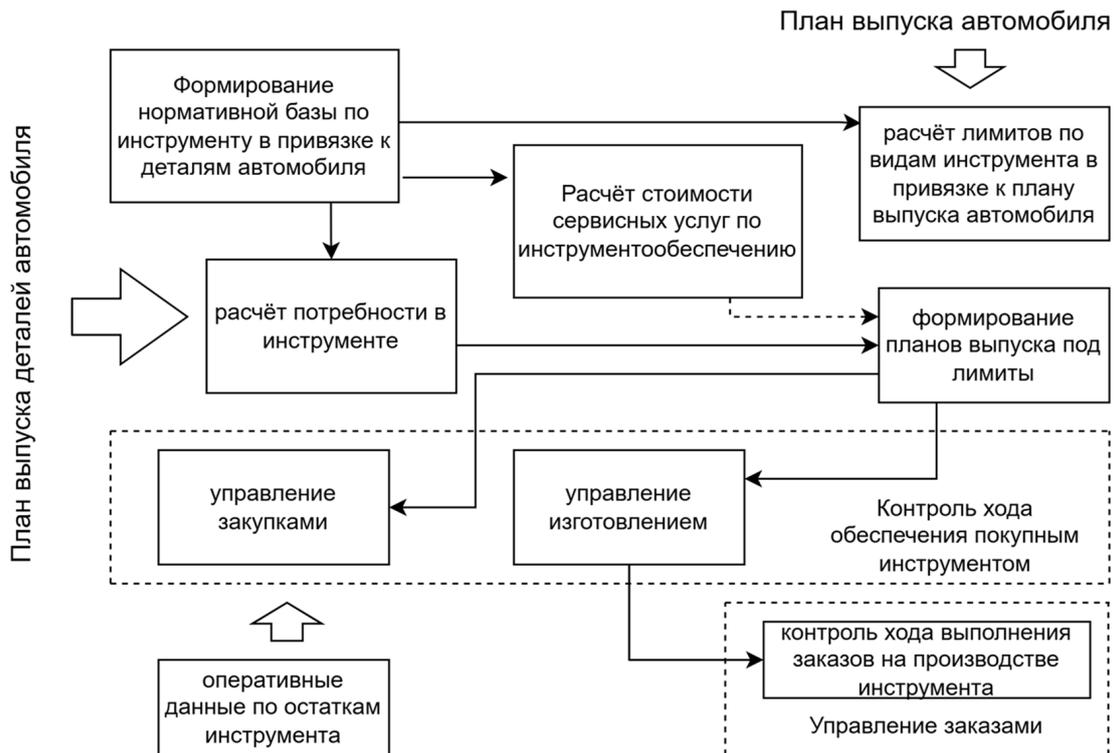


Рис. 2. Модель системы инструментообеспечения  
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Ключевым элементом методики является использование САПР, интегрированной с системами управления производством (MES) и планирования ресурсов предприятия (ERP). Для идентификации и отслеживания инструмента на всех стадиях жизненного цикла применяются технологии штрихкодирования и радиочастотной идентификации (RFID), обеспечивающие формирование цифрового профиля инструмента и накопление данных о его эксплуатации [10; 11].

В рамках концепции цифрового двойника инструмент рассматривается как объект, обладающий виртуальной моделью, отражающей его геометрию, технологические параметры, историю восстановления и фактическую стойкость в производственном процессе [12].

Экономическая оценка технологических решений и выбора инструмента проводится на основе принципа «стоимость на деталь» (Cost Per Part, CPP), при котором учитываются не только прямые затраты на приобретение или изготовление инструмента, но и совокупные издержки, связанные с его эксплуатацией, восстановлением, временем переналадки и простоем оборудования [12; 5].

Для количественной оценки эффективности инструментообеспечения использу-

ется интегральный показатель CPP, определяемый выражением

$$CPP = (C_{инст} + C_{уст} + C_{рем} + C_{пр} + C_{лог} + C_{ут}) / N_{рез},$$

где  $C_{инст}$  – затраты на приобретение или изготовление инструмента;  $C_{уст}$  – затраты на наладку и переналадку оборудования;  $C_{рем}$  – затраты на восстановление режущих свойств (переточка, нанесение покрытий);  $C_{пр}$  – потери, обусловленные простоем оборудования;  $C_{лог}$  – логистические и складские издержки;  $C_{ут}$  – затраты на утилизацию;  $N_{рез}$  – количество обработанных деталей за жизненный цикл инструмента.

Количество обработанных деталей определяется через суммарную стойкость инструмента:

$$N_{рез} = T_{сум} / t_{маш},$$

где  $T_{сум}$  – суммарная стойкость инструмента, мин;  $t_{маш}$  – машинное время обработки, мин.

Состояние инструмента в цифровой системе описывается вектором:

$$Z(t) = \{g, w(t), T_{ост}(t), N_{пар}(t)\},$$

где  $g$  – геометрические параметры инструмента;  $w(t)$  – текущая величина износа;  $T_{ост}(t)$  – остаточная стойкость;  $N_{пар}(t)$  – количество обработанных деталей.

Прогноз остаточной стойкости может быть представлен рекуррентным соотношением

$$T_{\text{ост}}(t+1) = T_{\text{ост}}(t) - T(V, S, t_p),$$

где  $T(V, S, t_p)$  – функция износа, зависящая от режима резания при обработке, определяемая эмпирическими или машинно обучаемыми моделями [13; 14; 15, с. 627–635].

Для интегральной оценки эффективности системы инструментообеспечения предложен обобщенный показатель:

$$E_{\text{эфф}} = \alpha K_{\text{дост}} + \beta K_{\text{исп}} + \gamma(1 - (CPR/CPR_{\text{баз}})),$$

где  $K_{\text{дост}}$  – коэффициент доступности инструмента;  $K_{\text{исп}}$  – коэффициент использования оборудования;  $CPR_{\text{баз}}$  – базовое значение CPR до внедрения системы;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – весовые коэффициенты.

Внедрение автоматизированных систем учета и цифровых средств проектирования позволяет снизить показатель CPR за счет повышения стойкости инструмента, сокращения времени переналадки и оптимизации складских запасов. Данный принцип означает, что инструментальный завод получает оговоренную заранее долю стоимости изделия, приходящейся на инструмент после выпуска готового изделия.

При таком подходе доступны к оценке заказчиком следующие положения работы инструментального завода:

- ответственность за весь технологический процесс: параметры качества, производительности и стоимости обработки;
- ответственность за полноту и своевременность поставок;
- стремление к постоянному улучшению – основополагающему положению системы бережливого производства (Lean manufacturing).

Сравнительный анализ альтернативных вариантов осуществляется с использованием показателей недисконтированной и дисконтированной эффективности инвестиций, что позволяет учитывать долгосрочные эффекты внедрения новых технологий и инструментальных решений. В качестве критериев используются показатели себестоимости обработки, коэффициента использования оборудования и устойчивости технологического процесса.

### Результаты исследования и их обсуждение

Внедрение разработанной организационно-технической модели системы инструментообеспечения позволяет получить следующие основные эффекты:

1. Оптимизация затрат на инструмент. Автоматизированный учет и контроль рас-

хода инструмента обеспечивают снижение избыточных складских запасов и уменьшение капитальных вложений в инструментальное хозяйство за счет повышения оборачиваемости номенклатуры.

2. Повышение доступности инструмента. Применение автоматизированных инструментальных складов и систем выдачи обеспечивает круглосуточный доступ к инструменту и сокращение времени переналадки оборудования, что способствует росту коэффициента его использования.

3. Повышение устойчивости технологических процессов. Систематическая дефектовка и восстановление режущих свойств инструмента позволяют поддерживать стабильные параметры обработки, включая точность, шероховатость поверхности и режимы резания.

4. Снижение себестоимости обработки. Применение принципа CPR обеспечивает перераспределение затрат с единицы инструмента на единицу продукции, что повышает точность экономической оценки технологических решений и способствует выбору наиболее эффективных вариантов обработки.

5. При таком подходе весь инструмент в течение всего срока эксплуатации находится в собственности инструментального завода. Оплата, по сути, представляет собой оплату за услуги, оказываемые инструментальным заводом. Это существенно облегчает экономические взаимоотношения и однозначно определяет ответственность. При оплате по принципу CPR достигается оптимальное сочетание ответственности и заинтересованности поставщика услуг в конечном результате работы, как в выполнении непосредственно своей функции (обеспечении технологического процесса), так и ключевой компетенции заказчика – выпуске деталей для сборки узлов и автомобилей.

Практическая апробация элементов предложенной модели на крупных отечественных предприятиях автомобилестроения, в том числе в рамках деятельности инструментальных подразделений ПАО «КАМАЗ», показала возможность повышения прозрачности процессов инструментообеспечения и снижения совокупных затрат за счет централизации управления и внедрения цифровых средств поддержки принятия решений.

Модель демонстрирует переход от традиционного понимания инструмента как материального ресурса к его трактовке как элемента сервисной услуги, интегрированной в производственный поток. Владение инструментом специализированным подразделением на протяжении всего жизненного цикла и расчеты по модели CPR формируют стимулы для повышения ресурса

инструмента и постоянного улучшения параметров обработки.

Сопоставление с зарубежными исследованиями показывает, что предложенный подход коррелирует с концепциями цифровых двойников и киберфизических производственных систем, в рамках которых инструмент рассматривается как объект с собственным цифровым представлением и историей эксплуатации [4; 12]. Это позволяет использовать методы прогнозирования стойкости и планирования восстановления на основе анализа больших массивов данных [13].

В то же время для отечественных предприятий сохраняется необходимость адаптации данных концепций к условиям действующей нормативной базы и структуре промышленной кооперации, что требует дальнейших исследований в области интеграции САПР, MES и PLM-систем в рамках единого информационного пространства предприятия [9; 14].

### Заключение

Стратегия, разработанная в рамках организационно-технической модели для системы инструментального обеспечения предприятий автомобилестроения, обеспечивает комплексное управление жизненным циклом режущего и вспомогательного инструмента на основе интеграции цифровых систем проектирования, эксплуатации и экономической оценки. Применение принципа СРР позволило повысить обоснованность выбора технологических решений и усилить ответственность поставщика услуг инструментального обеспечения за конечный результат производственного процесса.

Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего развития цифровых инструментальных платформ как одного из ключевых факторов повышения конкурентоспособности отечественного машиностроения в условиях индустриальной цифровизации.

### Список литературы

1. Лазарев А. Ю., Лисицин В. Н., Трушин Н. Н. Принципы эффективного управления инструментальным обеспечением станочного парка машиностроительного предприятия // Из-

вестия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 6. С. 215–223. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-6-215-224.

2. Asrol M. Industry 4.0 adoption in supply chain operations: A systematic literature review // *International Journal of Technology*. 2024. Vol. 15. Is. 3. P. 544–560 DOI: 10.14716/ijtech.v15i3.5958.

3. Da Silva L. R. R., Pimenov D. Y., da Silva R. B., Ercetin A., Giasin K. Review of Applications of Digital Twins and Industry 4.0 for Machining // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025. Vol. 9. Is. 7. P. 211. DOI: 10.3390/jmmp9070211.

4. Xie Y., Lian K., Liu Q., Zhang C., Liu H. Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy // *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 58. P. 305–312. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.08.007.

5. Botkina D., Hedlind M., Olsson B., Henser J., Lundholm T. Digital twin of a cutting tool // *Procedia Cirp*. 2018. Vol. 72. P. 215–218. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.178.

6. Рябов Е. А., Гречишников В. А., Хисамутдинов Р. М., Юрасов С. Ю., Юрасова О. И. Выбор критерия оценки стойкости концевых радиусных фрез // *СТИН*. 2018. № 10. С. 10–12. EDN: YUGUPZ.

7. Бобков А. Н., Славянов А. С., Хрусталева Е. Механизм инструментального обеспечения производства в структурно-функциональной модели предприятия // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2024. № 197. С. 199–213. DOI: 10.21515/1990-4665-197-017.

8. Рябов Е. А., Ступко В. Б., Хисамутдинов Р. М. Функциональные возможности САПР режущего инструмента: от моделирования до верификации // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2025. № 12. С. 302–305. EDN: BDYWIF.

9. Поддубко С. Н., Шмелев А. В. Цифровое производство: основы и тенденции формирования. Информационно-аналитический обзор // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2016. № 4. С. 66–74. EDN: XXDYRJ.

10. Camba J. D., Hartman N., Bertoline G. R. Computer-aided design, computer-aided engineering, and visualization // *Springer Handbook of Automation*. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 641–659. DOI: 10.1007/978-3-030-96729-1\_28.

11. Bamber C. J., Castka P., Sharp J. M., Motara Y. Cross-functional team working for overall equipment effectiveness (OEE) // *Journal of quality in maintenance engineering*. 2003. Vol. 9. Is. 3. P. 223–238. DOI: 10.1108/13552510310493684.

12. Qiao Q., Wanget J., Ye L., Gao R. X. Digital twin for machining tool condition prediction // *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 1388–1393. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.049.

13. Sun C., Dominguez-Caballero J., Ward R., Ayvar-Soberanis S., Curtis D. Machining cycle time prediction: Data-driven modelling of machine tool feedrate behavior with neural networks // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 75. Article. 102293. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102293.

14. Ramírez-Durán V. J., Berges I., Illarramendi A. Towards the implementation of Industry 4.0: A methodology-based approach oriented to the customer life cycle // *Computers in Industry*. 2021. Vol. 126. Article. 103403. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103403.

15. Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с. ISBN 5-217-03108-5.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FZSM-2025-0017 «САПР металлорежущего инструмента».

**Financing:** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task No. FZSM-2025-0017 “CAD of metal cutting tools”.