

УДК 681.7.068

Цифровой реинжиниринг позаказного производства оборудования на малых предприятиях

В.Ф. Булавин¹, Т.Г. Булавина¹, И.С. Петряшов², А.С. Степанов¹

¹ Вологодский государственный университет

² ООО «Александра-Плюс»

Digital reengineering of the customized equipment manufacture in small enterprises

V.F. Bulavin¹, T.G. Bulavina¹, I.S. Petryashov², A.S. Stepanov¹

¹ Vologda State University

² Alexandra-Plus LLC

В настоящее время цифровое производство выступает в качестве основного драйвера глобального роста экономики. Новый тренд утверждается как эффективное технологическое решение в условиях дефицита трудовых ресурсов и политики импортозамещения. В рамках мелкосерийного и позаказного производств значительный объем в портфеле заказов малых машиностроительных предприятий занимают работы, связанные с проектированием металлоконструкций, ремонтом, модернизацией и реинжинирингом вспомогательного оборудования для смежных компаний, строительных и транспортных организаций, торговых сетей и т. д. Активное внедрение технологий CAD/CAPP/CAE снижает время и стоимость производства, что особенно важно в условиях санкционных ограничений. Наряду с традиционными методами обработки материалов находят применение аддитивные технологии, которые позволяют создавать необходимые компоненты и детали непосредственно на месте. Это уменьшает зависимость от импорта и риски, связанные с задержками в поставках или увеличением цен. В этих условиях инновационные изменения в технологии и трансформация управления производством актуализируют внедрение на всех уровнях интеллектуальной модели бизнес-процессов. Для распределенных предприятий это устанавливает единые правила взаимодействия и логистики, обеспечивая поддержку параллельной работы разработчиков.

EDN: UKCMBK, <https://elibrary/ukcmbk>

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровой реинжиниринг, аддитивные технологии, малые предприятия

Digital manufacture today appears to be the main driver in the global economic growth. The new trend establishes itself as an effective technological solution in the context of labor shortage and import substitution policies. Within the frames of small-scale and customized manufacture, significant amount in the order portfolio of small engineering enterprises is occupied by work relating to design of metal structures, repair, modernization and reengineering of the auxiliary equipment for the related companies, construction and transport organizations, retail chains, etc. Active CAD/CAPP/CAE technologies implementation reduces manufacture time and cost, which is especially important in the context of sanctions. Along with traditional methods in material machining, additive technologies are being used making it possible to manufacture the required components and parts directly on site. This reduces dependence on imports and risks associated with delays in delivery or prices increase. Under these conditions, innovation changes in technology and transformation of the

manufacture management are actualizing introduction of the business processes' intelligent model at all levels. In regard to the distributed enterprises, this establishes uniform rules in interaction and logistics, and also provides support in parallel work of the developers.

EDN: UKCMBK, <https://elibrary/ukcmbk>

Keywords: digital twin, digital reengineering, additive technologies, small enterprises businesses

Инновационный потенциал предприятия раскрывается через цифровое сопровождение конструкторско-технологического обеспечения производства и реализуется программными средствами приложений CAD/CAPP/CAE. Сфера управления, сопровождая этот процесс, формирует единое информационное пространство на основе функционала MES/PDM [1–4].

Цель работы — масштабирование технологий CAD/CAPP/CAE в малые машиностроительные предприятия и их соединение с цифровым реинжинирингом, обеспечивая распространение передовых производственных процессов и бизнес-моделей в единое информационное окружение по управлению предприятием.

Обратный инжиниринг. Восстановление, модернизация, ремонт и обслуживание оборудования при отсутствии конструкторской документации и запасных компонентов регулируют в процессе цифрового реверсивного инжиниринга. Техника множественных ручных замеров для получения виртуальных прототипов с последующей регистрацией результатов в базе данных автоматизирована программно-технологическими платформами.

В технологии цифрового реинжиниринга задачи восстановления утраченных рабочих функций механизма и оцифровки конструкций решают через следующие последовательные процедуры: объемное сканирование деталей

разобранного изделия и перевод облака точек в программную среду с целью составить полигональную/твердотельную 3D-модель.

Техника параметризации и поиск аналогов в банках данных позволяют получить требуемый результат, что дает возможность перейти к уточнению требований и конфигурации детали (изделия) с учетом окружения. Виртуальные исследования (подбор материала, инжиниринг и проверка кинематики) должны подтвердить количественные и качественные характеристики объекта испытаний как результат свойств цифрового двойника. Проектирование технологии изготовления с учетом имеющегося оборудования позволяет перейти к оформлению пакета конструкторско-технологической документации [5–7].

В качестве примера рассмотрим реверс-инжиниринг и модификацию 3D-принтера с бесконечной осью, обладающего расширенными технологическими возможностями печати. Концептуально в принтере для перемещения сопла совместно с движением конвейерной ленты должна быть реализована наклонная (под углом 45°) система координат.

Обзор IdeaFormer IR3, Creality 3DPrintMill CR-30 и других прототипов-аналогов позволил сформулировать следующее техническое задание:

1) спроектировать настольный вариант оборудования с технологией печати FDM/FFF и размером области построения $250 \times 250 \times \infty$ мм;



Рис. 1. Цифровой прототип конвейерного принтера при наличии (а) и отсутствии (б) роликовой поддержки

2) обеспечить наличие подогреваемой конвейерной ленты в качестве стола принтера для непрерывной трехмерной печати длинномерных деталей;

3) предусмотреть наличие двойного экструдера Bowden с целью использования материалов разного цвета при печати поддержек сложных деталей;

4) применить линейные направляющие для лучшей кинематики принтера;

5) гарантировать жесткость конструкции принтера применением алюминиевого профиля для рамы и металлических крепежных пластин;

6) обеспечить точность печатаемых деталей, используя кинематику движения CoreXY.

Отсутствие контрольного изделия и относительно несложная конструкция исключают такой этап обратного инжиниринга, как объемное сканирование деталей. Наличие большого числа стандартных комплектующих и архитектура оборудования дают возможность непосредственно перейти к созданию цифровых двойников деталей и узлов. Конфигурирование сборочных единиц лежит в компетенции разработчика (рис. 1, а и б).

Основные этапы проектирования узлов конвейерного принтера. Основание (несущая рама) принтера выполнено из стандартного алюминиевого профиля 2040, где внутри корпуса предусмотрены ниши для электронных компонентов управления. Чтобы обеспечить демпфирующий эффект, оборудование установлено на прорезиненные подставки (рис. 2).

Узлы закреплены на несущей раме посредством металлических пластин и винтового соединения с Т-образными гайками, которые обеспечивают надежное соединение элементов

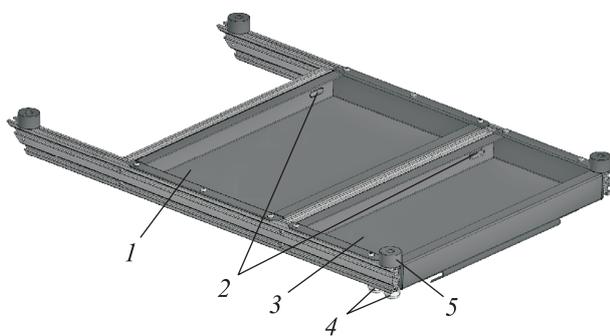


Рис. 2. Цифровой двойник несущей рамы принтера: 1 и 3 — центральный и передний ящики для электроники; 2 — кожухи пазов; 4 — сальники PG9; 5 — прорезиненные подставки

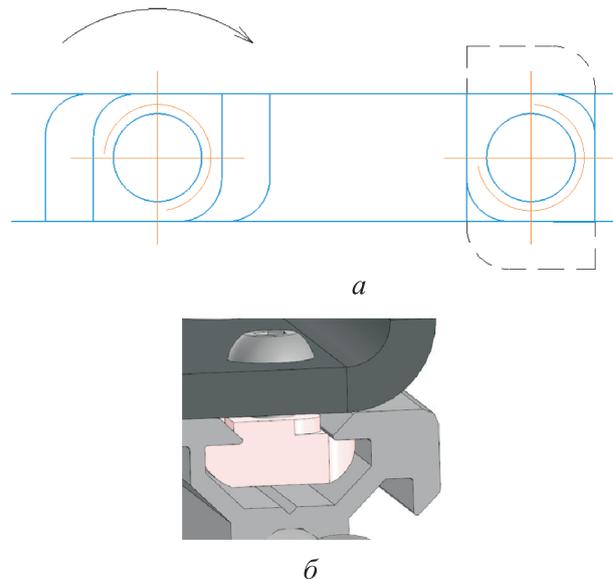


Рис. 3. Конструктивная схема Т-образной гайки (а) и ее цифровой образ (б) в профиле

и способны выдержать достаточно высокие нагрузки. Крепеж вложен в паз профиля и зафиксирован при затяжке поворотом на 90° (рис. 3).

К несущей раме под углом 45° установлен портал принтера из алюминиевого профиля 2040, который зафиксирован крепежными пластинами, что обеспечивает жесткость конструкции. Цифровые прототипы несущей рамы принтера с порталом при отсутствии (а) и наличии (б) дополнительных алюминиевых профилей показаны на рис. 4, а и б.

Портал принтера является одной из основных несущих частей принтера и служит для крепления направляющих оси Y и шаговых двигателей. На каретках, направляющих оси Y, закреплена направляющая оси X, где расположена горячая часть экструдера. Помимо этого портал и опорные профили служат основой для крепления экструдеров и на специальных кронштейнах катушек с материалом (см. рис. 1), шаговых электродвигателей, концевых выключателей и других компонентов (рис. 5).

В конструкции портала реализована картезианская кинематика движения CoreXY, используемая для профессионального оборудования. Эта схема отличается от других оригинальными методами позиционирования горячей части экструдера.

На раму принтера установлен конвейерный стол. Перемещение конвейерной ленты с роликовой поддержкой не имеет ограничений на



Рис. 4. Цифровой прототип несущей рамы с порталом принтера при отсутствии (а) и наличии (б) дополнительных алюминиевых профилей

длину печатаемых деталей. Это позволяет печатать как удлиненные, так и последовательно однотипные детали без останова и переналадки оборудования. Цифровой прототип конвейерного стола без нейлоновой ленты показан на рис. 6. Конструкция имеет две части: одна — подогреваемая, другая, служащая для поддержания единого уровня и равномерной печати деталей.

Конструктивные решения для узлов принтера. Механизм натяжения конвейерной ленты показан на рис. 7. Вал ведомого ролика свободно перемещается внутри паза крепления. Натяжение и выравнивание полотна ленты

осуществляется регулировкой натяжного винта, причем подобная операция предусмотрена с обеих сторон креплений ролика.

Конвейерная лента изготовлена из износостойкого нейлона, обеспечивающего хорошую адгезию полимеров. Отделение от конвейерного стола готовых изделий происходит естественным путем после остывания нижней части на изгибе к ведомому ролику или посредством установленного в конце движения ножа, поддерживающего деталь.

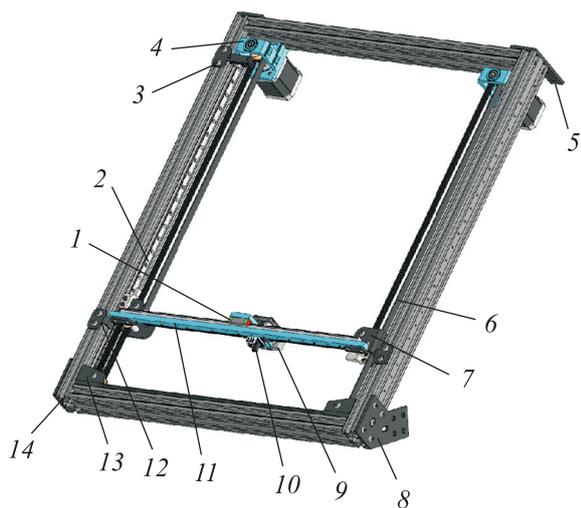


Рис. 5. Цифровой двойник портала принтера:
 1 — каретка оси X; 2 — линейная направляющая оси Y;
 3 — крепление с концевым выключателем оси Y;
 4 — шаговый электродвигатель в корпусе; 5 — крепление упоров; 6 — ремень GT2; 7 — каретка со шкивами;
 8 — пластина крепления к несущей раме; 9 — горячая часть экструдера; 10 — концевой выключатель оси X;
 11 — балка оси X; 12 — физический ограничитель;
 13 — корпус шкивов; 14 — профиль 2040

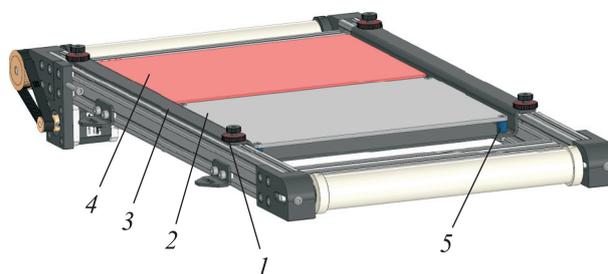


Рис. 6. Цифровая сборка конвейерного стола без ленты:

- 1 — механизм регулирования уровня столов;
- 2 и 4 — стол без подогрева и с подогревом;
- 3 — крепление столов; 5 — втулка

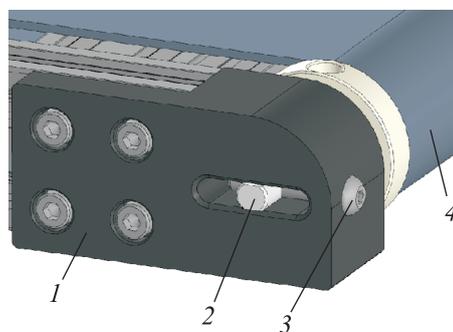


Рис. 7. Цифровая сборка механизма натяжения конвейерной ленты:

- 1 и 2 — крепление и вал ведомого ролика; 3 — натяжной винт; 4 — конвейерная лента на ролике

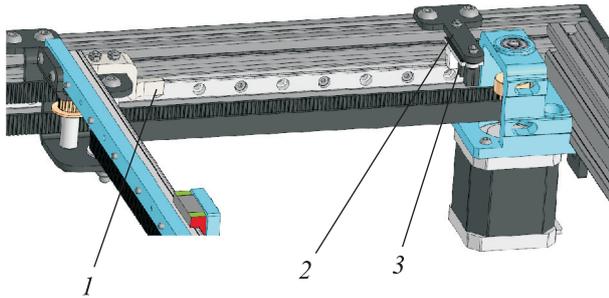


Рис. 8. Цифровая сборка концевого выключателя оси Y:

1 — щуп; 2 — крепление к профилю 2040;
3 — концевой выключатель

В принтере установлены концевые выключатели для осей X и Y (рис. 8). Ось Z, расположенная вдоль конвейерного стола, в концевом выключателе не нуждается. Размыкание цепи питания принтера происходит, когда при движении горячей части щуп пересекает оптическую зону концевого выключателя. На каждую ось поставлен только один концевой выключатель.

Инжиниринговое сопровождение проекта. Силовой набор конструкции конвейерного принтера, выполненный из алюминиевого профиля 2040, обладает необходимым запасом прочности и не испытывает серьезных нагрузок даже при аварийных режимах. В конструкции принтера применена схема Bowden экструдера, что существенно снижает массу его горячей части. Масса остальных навесных компонентов является незначительной. Стол, ведущий вал принтера и конвейерная лента также не подвержены большим механическим нагрузкам.

Уязвимым звеном конструкции может являться кронштейн для установки кассеты с пластиком (рис. 9). Прочностной анализ цифрового двойника этого узла в САЕ-приложении с учетом заданных нагрузок позволяет исследовать поведение материала изделия и выбрать минимальный диаметр стержня, на который насажен ролик с подшипниками.

В статическом расчете основные нагрузки, действующие на элемент, — реакции в крепежных отверстиях и масса внешних объектов. Выбранная система нагружений, определяя силовую схему, дополнена условиями закрепления детали в конструкции (рис. 10). Генерация сетки конечных элементов формирует корректную расчетную модель [10–12].

Программно-технологическая платформа CAE позволяет определять количественные и качественные характеристики свойств испытуемого объекта как результат исследования свойств его цифрового двойника. Прочностной анализ на этапе проектирования дает возможность найти конструктивные решения, отвечающие требованиям по надежности и безопасности [10–12]. Результаты симуляции оформляют протоколом и цветными картами измеренных величин (рис. 11).

Цифровой прототип настольного 3D-принтера с двойным экструдером для непрерывной трехмерной печати длинномерных деталей приведен на рис. 1, а и б. Наличие двойного экструдера позволяет увеличить скорость печати, используя разные цвета или материалы.

Аддитивное производство. Эффективным технологическим решением в производстве являются аддитивные технологии (АТ), одной из которых выступает 3D-печать. Это направление позволяет реализовать сложные геометрические структуры, которые не удастся воспроизвести традиционными методами обработки материалов. К АТ относятся послойное наплавление (FDM), селективное лазерное плавление (SLM), многоструйное моделирование (MJM), лазерная стереолитография (SLA), цифровая обработка светом (DLP) и другие методы. Все

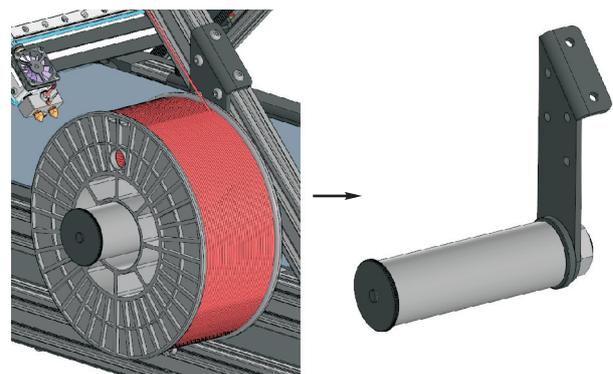


Рис. 9. Цифровая сборка кронштейна для катушки с пластиком



Рис. 10. Цифровой двойник изделия с условиями закрепления и приложения нагрузки

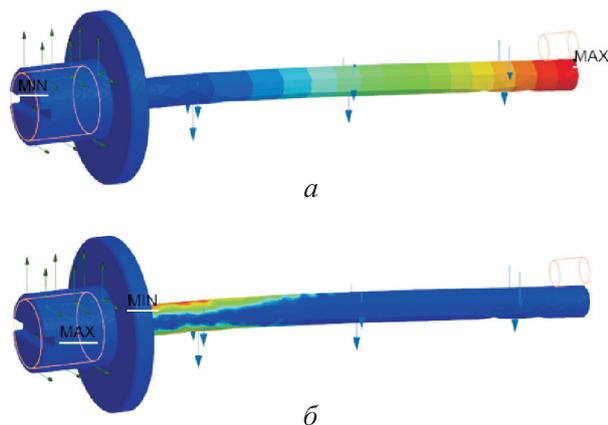


Рис. 11. Карты перемещений (а) и коэффициента запаса прочности (б) при внешней нагрузке 50 Н

они находят широкое применение в мелкосерийном и позаказном производствах, изготовлении расходных деталей, при создании прототипов демонстрационных узлов и т. д.

При FDM-технологии, основываясь на цифровой модели, головка принтера перемещается вдоль трехмерных координат, распределяя разогретый в виде волокна пластичный материал слой за слоем. Отвердевая, пластик становится твердым, формируя трехмерный объект. Использование различных типов пластика, таких как PLA, HIPS, ABS и акрил, позволяет получать разные свойства и характеристики в итоговой печати.

В SLM-процессе лазерный луч сканирующим образом или точно нагревает распределенный предварительно на платформе слой металлического порошка до температуры плавления. Это приводит к плавлению и спеканию материала и образованию сегмента или слоя требуемой формы. Этот процесс повторяется слой за слоем до получения конечного результата. Каждая из АТ имеет свои ограничения, поэтому существуют разновидности 3D-печати.

3D-печать включает в себя три этапа:

- создание цифрового двойника объекта с помощью 3D-сканера или программного инструментария;
- нанесение слоев с использованием различных методов (экструзия, связывание оптической смолой, плавление металлического порошка) и физическое формирование объекта;
- завершение процесса с последующей постобработкой (удаление поддержки, шлифовка или другие операции с целью получения товарного вида).

АТ открывают путь к индивидуализации и кастомизации изделий с учетом требований и предпочтений потребителя. Алгоритмы САО-приложений и бионический дизайн позволяют создавать более легкие элементы и модернизировать старые детали с сохранением требуемого функционала, которые можно изготовить без длительной подготовки.

К преимуществам 3D-печати перед другими АТ следует отнести отсутствие необходимости создания инструментов или сложных пресс-форм, сокращение числа оборудования, времени и затрат на организацию производства. Технология ведет к уменьшению отходов, экономии энергии, снижению экологической нагрузки, раскрывая инновационный потенциал в дизайне изделий [13–15].

Интеллектуализация производства. Технологии и алгоритмы взаимодействия между программно-технологическими платформами выступают результатом и инструментами интеллектуализации производственной деятельности [16–18]. Экспертные системы, используемые на предприятиях машиностроения, являются шагом к использованию искусственного интеллекта (ИИ), хотя имеют ограниченную функциональность. Нестандартные ситуации нельзя решить без человеческого вмешательства. От ИИ ожидают участия в создании инновационных концепций и непредсказуемых решений, нахождения нестандартных идей и паттернов в данных.

В машиностроении существует несколько стратегий применения ИИ. В первую очередь можно выделить процесс подготовки производства, где требуются автоматизация процессов проектирования и анализ большого количества инженерных данных с целью многофакторной оптимизации компонентов изделий и конструкции по критериям производительности, надежности, экономичности и т. д. Непосредственно в ходе производства востребован контроль технологических операций в реальном времени, что позволит своевременно выявлять и предотвращать нарушения технологии, получать информацию о качестве продукции, энергопотреблении и вредных выбросах.

Сфера сопровождения и обслуживания проектов требует участия ИИ по анализу спроса, сбору данных и систематизации систем мониторинга для прогнозирования отказов, чтобы предсказать и предотвратить непредвиденные сбои, выдать рекомендации по оптимизации

обслуживания, тем самым снизив затраты на ремонт.

В управленческом секторе использование ИИ актуально как инструмент получения информации по оптимизации логистики снабжения компонентами и материалами, по средне- и долгосрочному прогнозированию будущих потребностей и затрат, времени доставки, по снижению отходов и рисков. Прогноз-корректирующая аналитика ИИ в сочетании с технологиями BIG DATA способна к радикальному переосмыслению и координации существующих бизнес-моделей [16–18].

Выводы

1. Технологические инновации создают новые направления в развитии производства, отвечают росту конкурентоспособности и качества изделий, приводят к ускорению выпуска новых видов продукции. Цифровизация технологических процессов на малых предприятиях находит отражение во внедрении и активном

применении аддитивного производства. Это позволяет снизить количество этапов технологической подготовки производства, сократить номенклатуру применяемого оборудования и приспособлений, ограничить влияние человеческого фактора — условия положительных экономических эффектов от использования АТ.

2. Расширение компетенций разработчиков позволяет проектировать оборудование и приборы с пониженными показателями материало- и энергоёмкости, одновременно достигая высоких эргономических показателей. Расширение числа программно-технологических средств углубляет развитие производств с цифровым сопровождением. Это приводит к повышению автоматизации и кастомизации товаров и услуг, выстраивает логистику взаимодействия распределённых производств при организации их бизнес-процессов.

3. Использование систем искусственного интеллекта требует обучения персонала работе с новыми технологиями, а также учёта аспектов этики и безопасности.

Литература

- [1] *Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии*. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoye_proizvodstvo_112017.pdf (дата обращения: 07.12.2023).
- [2] Боровков А.И., Рябов Ю.А. Перспективные направления развития передовых производственных технологий в России. *Мат. XVII Апрельской междунар. науч. конф. По проблемам развития экономики и общества*. Т. 3. Москва, ВШЭ, 2017, с. 381–389.
- [3] Боровков А., Рябов Ю. О дорожной карте «Технет» (передовые производственные технологии) национальной технологической инициативы. *Трамплин к успеху*, 2017, № 10, с. 8–11.
- [4] *Digital spillover*. Huawei, 2017. URL: https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci_digital_spillover.pdf (дата обращения: 07.12.2023).
- [5] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Кошутин Д.В. и др. Цифровая трансформация технологического сопровождения производства в малых предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 9, с. 15–29, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-9-15-29>
- [6] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. и др. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. I. Конструкторский этап. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2020, т. 63, № 3, с. 242–249, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-242-249>
- [7] Булавин В.Ф., Яхричев В.В. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли. *САПР и графика*, 2018, № 6, с. 52–55.
- [8] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Валидация САД-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2017, № 5, с. 64–72.
- [9] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev V.V. Design of ultrasonic auxiliary equipment. In: Proc. ICIE 2021. Springer, 2022 pp. 9–16, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_2
- [10] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Трансформация технологического обеспечения малых предприятий машиностроения. *Цифровая экономика и индустрия 4.0: Форсайт Россия. Сб. тр. науч.-практ. конф.* Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2020, с. 28–40.

- [11] Алямовский А.А. *Инженерные расчеты в Solid Works Simulation*. Москва, ДМК-Пресс, 2010. 464 с.
- [12] Замрий А.А. *Практический учебный курс. CAD/CAE система ARM WinMachine*. Москва, ДМК-Пресс, 2007. 144 с.
- [13] Bulavin V.F., Bulavin V.F., Bulavina T.G., et al. Digital design and technological innovation in the small machine building sector. *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 939, art. 012016, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012016>
- [14] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Stepanov A.S. Digital space of small enterprises in engineering. In: Proc. ICIE 2021. *Springer*, 2021, pp. 462–468, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_54
- [15] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrlichev V.V., et al. Digital support of production small business preparation in engineering. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1399, no. 3, art. 033045, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033045>
- [16] Ширяев Н. PLM/PDM/ERP: реалии и перспективы. *САПР и графика*, 2007, № 12, с. 16–20.
- [17] Бабкин А.В., ред. *Цифровизация экономических систем: теория и практика*. Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2020. 795 с.
- [18] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Koshutin D.V. Engineering support & infrastructure of small — sized mechanical engineering companies. In: Proc. ICIE 2023. *Springer*, 2023, pp. 530–539, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_53

References

- [1] *Tsifrovoye proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii* [Digital Manufacturing. Methods, ecosystems, technologies]. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoye_proizvodstvo_112017.pdf (accessed: 07.12.2023). (In Russ.).
- [2] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Perspective directions of development of advanced production technologies in Russia]. *Mat. XVII Aprelskoy mezhd. nauch. konf. Po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva*. T. 3 [Proc. XVIII April Int. Sci. Conf. on Problems of Economy and Society Development. Vol. 3]. Moscow, VShE Publ., 2017, pp. 381–389. (In Russ.).
- [3] Borovkov A., Ryabov Yu. On "Tekhnet" roadmap (advanced manufacturing technologies) of the National Technological Initiative. *Tramplin k uspekhu*, 2017, no. 10, pp. 8–11. (In Russ.).
- [4] *Digital spillover*. Huawei, 2017. URL: https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci_digital_spillover.pdf (accessed: 07.12.2023).
- [5] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Koshutin D.V. et al. Digital transformation of technological support of production in small enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 9, pp. 15–29, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-9-15-29> (in Russ.).
- [6] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrlichev V.V. et al. Digital format for preparation of instrument production. Part I. Design stage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2020, vol. 63, no. 3, pp. 242–249, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-242-249> (in Russ.).
- [7] Bulavin V.F., Yahrlichev V.V. Digital technologies in small businesses in the engineering industry. *SAPR i grafika*, 2018, no. 6, pp. 52–55. (In Russ.).
- [8] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrlichev V.V. Validation of cad products in small enterprises machinery sector. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2017, no. 5, pp. 64–72. (In Russ.).
- [9] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrlichev V.V. Design of ultrasonic auxiliary equipment. In: *Proc. ICIE 2021*. Springer, 2022 pp. 9–16, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_2
- [10] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrlichev V.V. [Digital innovations for small entrepreneurship mechanical engineering]. *Tsifrovaya ekonomika i industriya 4.0: Forsayt Rossiya. Sb. tr. nauch.-prakt. konf.* [Digital Economy and Industry 4.0: Russian Foresight. Proc. Sci.-Pract. Conf.]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2020, pp. 28–40. (In Russ.).
- [11] Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v Solid Works Simulation* [Engineering calculations in Solid Works Simulation]. Moscow, DМК-Press Publ., 2010. 464 p. (In Russ.).
- [12] Zamriy A.A. *Prakticheskiy uchebnyy kurs. CAD/CAE sistema ARM WinMachine* [Practical training course. CAD/CAE ARM WinMachine system]. Moscow, DМК-Press Publ., 2007. 144 p. (In Russ.).

- [13] Bulavin V.F., Bulavin V.F., Bulavina T.G., et al. Digital design and technological innovation in the small machine building sector. *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 939, art. 012016, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012016>
- [14] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Stepanov A.S. Digital space of small enterprises in engineering. In: Proc. ICIE 2021. *Springer*, 2021, pp. 462–468, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_54
- [15] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrichev V.V., et al. Digital support of production small business preparation in engineering. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1399, no. 3, art. 033045, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033045>
- [16] Shiryayev N. PLM/PDM/ERP: reality and prospects. *SAPR i grafika*, 2007, no. 12, pp. 16–20. (In Russ.).
- [17] Babkin A.V., ed. *Tsifrovizatsiya ekonomicheskikh sistem: teoriya i praktika* [Digitalisation of economic systems: theory and practice]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2020. 795 p. (In Russ.).
- [18] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Koshutin D.V. Engineering support & infrastructure of small — sized mechanical engineering companies. In: Proc. ICIE 2023. *Springer*, 2023, pp. 530–539, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_53

Статья поступила в редакцию 26.12.2023

Информация об авторах

БУЛАВИН Вячеслав Федорович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: bulavin35@mail.ru).

БУЛАВИНА Тамара Георгиевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: tamarabulavina35@mail.ru).

ПЕТРЯШОВ Игорь Сергеевич — главный специалист отдела информационных технологий компании. ООО «Александра-Плюс» (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: toolzz@yandex.ru).

СТЕПАНОВ Александр Сергеевич — кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: alex.stepanov@mail.ru).

Information about the authors

BULAVIN Vyacheslav Fedorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 15, e-mail: bulavin35@mail.ru).

BULAVINA Tamara Georgievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 15, e-mail: tamarabulavina35@mail.ru).

PETRYASHOV Igor Sergeevich — Chief Specialist, Department of Information Technology. Aleksandra-Plus LLC (160000, Vologda, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 15, e-mail: toolzz@yandex.ru).

STEPANOV Alexander Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 15, e-mail: alex.stepanov@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Петряшов И.С., Степанов А.С. Цифровой реинжиниринг позаказного производства оборудования на малых предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 8, с. 52–60.

Please cite this article in English as:

Bulavin V.F., Bulavina T.G., Petryashov I.S., Stepanov A.S. Digital reengineering of the customized equipment manufacture in small enterprises. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 8, pp. 52–60.