

УДК 681.7.068

doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-15-29

# Цифровая трансформация технологического сопровождения производства в малых предприятиях

В.Ф. Булавин, Т.Г. Булавина, Д.В. Кошутин, В.В. Яхричев, А.С. Степанов

Вологодский государственный университет

## Digital Transformation of Technological Support of Production in Small Enterprises

V.F. Bulavin, T.G. Bulavina, D.V. Koshutin, V.V. Yakhrichev, A.S. Stepanov

Vologda State University

Технологическая трансформация предусматривает интеграцию средних и малых машиностроительных предприятий в единое поле виртуальных фабрик на основе стратегии перехода к цифровому производству в рамках национальных проектов и Национальной технологической инициативы. Дивергентное мышление рассматривается в качестве движущего фактора в сфере производства и управления, что значительно влияет на все стороны социально-экономической деятельности. Конвергентное применение идеологий CAD/CAM/CAPP/CAE/CAO находится на этапе первоначального использования при том, что отдельные компоненты процесса нашли широкое применение на предприятиях всех уровней. Рассмотрено формирование группы компетенций, обеспечивающих объединение передовых производственных технологий, а также их распространение в сфере малых и средних машиностроительных предприятий. Выпуск изделий для рынков с новыми качествами и создание высокотехнологичных направлений в промышленности приводят к производству глобально конкурентоспособной продукции. Для ответа на эти тренды необходима глубокая автоматизация, дигитализация и интеллектуализация производственных процессов, что требует объединения материального и цифрового виртуального производств. Динамичное окружение и обусловленные им вызовы предполагают необходимость быстрого принятия эффективных решений с целью сохранения конкурентоспособности в долгосрочной перспективе и способности к ускорению процессов адаптации. Эти тотальные изменения сопровождаются развитием принципиально новых бизнес-процессов на всех уровнях.

**Ключевые слова:** 3D-прототип, цифровое сопровождение, конструкторское и технологическое сопровождение производства, информационная среда, малые предприятия

Technological transformation involves the integration of medium and small machine-building enterprises into a single field of virtual factories. The integration is based on the strategy of transition to digital production within the framework of national projects and the National Technology Initiative. Divergent thinking is regarded as a driving factor in production and management, which significantly affects all aspects of socio-economic activity. The convergent application of CAD/CAM/CAPP/CAE/CAO ideologies is at the initial stage of use, while individual process components are widely used at all levels of enterprises. The paper considers the development of a group of competencies that ensure the combination of advanced production technologies, as well as their distribution in the field of small

and medium-sized machine-building enterprises. The production for markets of new qualities and the development of high-tech directions in the industry lead to the production of globally competitive products. To respond to these trends, deep automation, digitalization, and intellectualization of production processes are required, which implies the combination of material and digital virtual production. A dynamic environment and the challenges it entails need quick and effective decisions to remain competitive in the long term and the ability to accelerate adaptation processes. These total changes are accompanied by the development of fundamentally new business processes at all levels.

**Keywords:** 3D prototype, digital support, technological support of production, information environment, small businesses

Стратегия развития машиностроения опирается на тренд виртуальных производств, составной частью которых являются малые и средние предприятия. Эти вызовы определяют вектор развития отрасли, отвечая повышению производительности труда, и нацелены на экономический рост и сохранение национального суверенитета [1–3]. Единое информационное пространство технологических бизнес-процессов предприятий реализуется программными платформами системы автоматизированного проектирования (САПР) на базе CAD/CAPP/CAM/CAE/CAO. Связанное с системами PDM/PLM цифровое отображение свидетельствует о переходе предприятий к виртуальному типу производства и соединении материального и цифрового производств [4–7].

Цель работы — позиционирование малых машиностроительных предприятий в качестве участников виртуального производства, охваченного функционалом платформ PDM/PLM.

Наличие необходимых компетенций у участников проекта в области цифрового проектирования и технологического сопровождения является условием этой бизнес-модели. Логистика взаимодействий как внутри отдельных звеньев этой группы, так и между участниками определяется степенью их кооперации и уровнем интеграции с головным предприятием в рамках функционирования систем MES (ERP).

Концепция сквозного цифрового проектирования и сопровождения дает возможность для кастомизации и персонализации продукции с помощью опций управления конфигурациями изделия. Платформы PDM/PLM реализуют этот функционал. Здесь формируется дерево изделия как объектная структура, связанная со всеми разделами проекта и технологическими процессами (ТП) изготовления компонентов. Выполнение заданий в едином информационном окружении технологических и

конструкторских отделов является одним из запросов цифрового производства [6, 8–10].

Требования к цифровому содержанию в сфере автоматизированной конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) [6, 8–10] обусловлены необходимостью обеспечения конкурентных преимуществ за счет ускоренного выхода на рынок и сложностью проектных работ. В этих реалиях основным направлением совершенствования КТПП являются инновационные технологии в организации труда на основе электронного документооборота. Платформы САПР, базирующиеся на принципах прототипирования и моделирования, с поддержкой экспертных модулей и банков данных для решения технологических задач [6, 8–11], обеспечивают сопровождение производства в малых и средних предприятиях.

Интеграция платформ CAD/CAPP/CAM/CAE/CAO в единое инженерное взаимодействие ориентирована на формирование виртуального предприятия путем создания общей информационной среды с целью получения доступа к современным способам и видам работ. Эти тенденции требуют преобразований как организации, так и культуры производства [6, 8–11]. Конструирование 3D-моделей является проявлением конвергентного цифрового мышления в подготовительном периоде [12].

**САД-автоматизация при сопровождении производства.** Цифровое проектирование включает в себя конструкторский и технологический разделы, а также инжиниринговое сопровождение по силовым, тепловым, оптимизационным и другим расчетам элементов и модулей конструкции [6, 8–11]. На этапе конструкторского сопровождения производства (КСП) уточняются кинематика и компоновка, состав продукта, а также общая конфигурация изделия при соблюдении требований

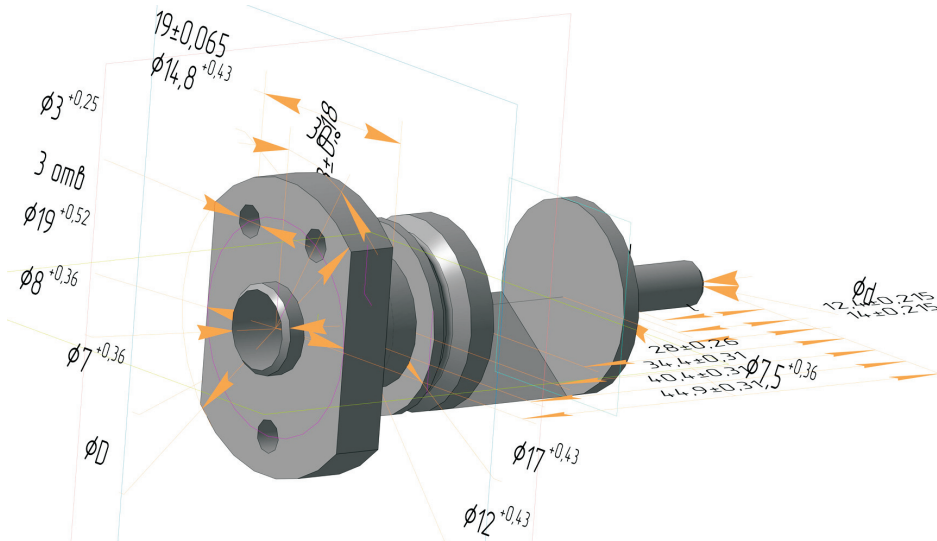


Рис. 1. Электронная модель изделия «Ось»

унификации и предельного наполнения его стандартными комплектующими. В ходе КСП назначаются физико-химические свойства материалов деталей и прогнозируются эргономические показатели проектируемого продукта.

Процесс автоматизированного проектирования, включающий в себя классификацию и кодирование новых элементов, сопровождается поиском их аналогов в банках данных типовых компонентов или в выполненных ранее проектах с использованием методов синтеза и адресации. Технологии 3D-моделирования предполагают оформление электронных моделей изделий согласно ГОСТ 2.052–2015, а также цифровых двойников сборочных единиц и конструкции в целом [6, 8–11].

Выбор методологии проектирования («снизу вверх», «сверху вниз», комбинированной и др.) определяется целесообразностью, являясь прерогативой конструктора. Формирование в электронном формате рабочих чертежей деталей и спецификаций сборок осуществляется автоматически в САД-системе. На рис. 1 приведена электронная модель изделия «Ось» из состава мехатронного прибора, выполненного в среде КОМПАС-3D.

Техника параметризации регулирует возможности быстрого перестроения объекта и управления изменениями, что обеспечивает разнообразие в формообразовании для моделей подобных изделий на основе единожды созданного цифрового двойника. Помимо сведений о характеристиках объекта параметрическое изображение содержит информацию о связях и

ограничениях, что позволяет задать правила поведения геометрии при ее изменении.

Последовательность работы для детали с исполнениями опирается на технологию параметризации, реализуя принцип «одна модель — много вариаций», так как нацелена на применение большого числа переменных (пользовательских, параметров операций, предельных отклонений). У созданных исполнений одинаковая форма, но разные размеры, которые устанавливаются с помощью аргументов, причем режим сопровождается оформлением тре-

Обозначение	Материал	Масса	d	l	D	L
A/18.314.632	Сталь 45 ГОСТ 1050-2013	0,03	4	11	26	2
-01	БрАЖ9-4 ГОСТ 18175-78	0,06	8	25	40	8

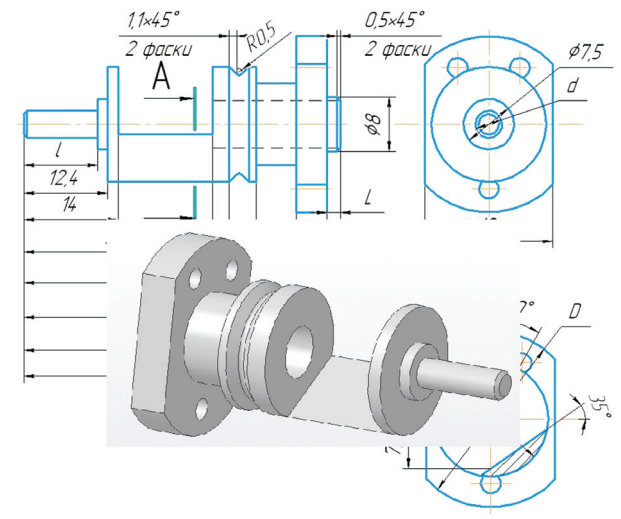


Рис. 2. Документация на изделие «Ось» с исполнениями

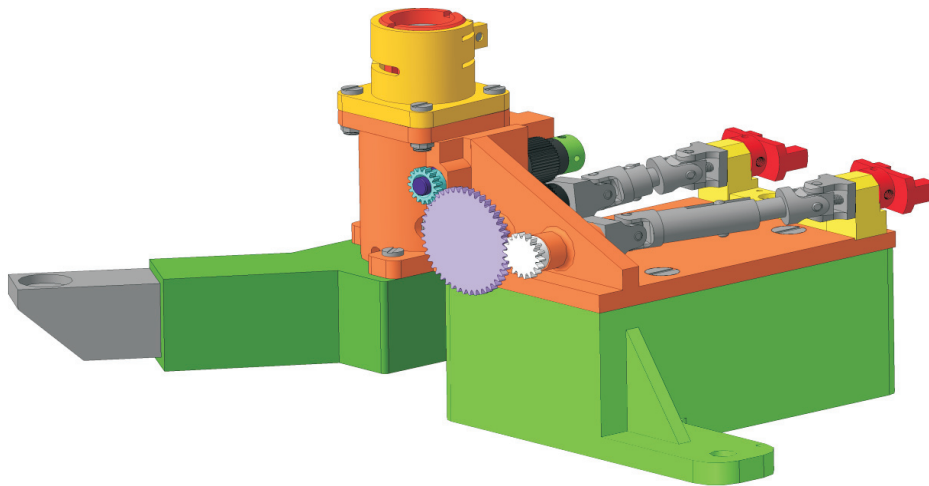


Рис. 3. 3D-прототип под сборки механизма выверки визира мехатронного прибора

буемой документации на деталь (рис. 2). Значительно сокращает трудозатраты и сроки выполнения проектов работа с приложениями, когда проектирование изделий осуществляется с помощью средств объектного моделирования, при разработке конструкции из сходных модулей и средствами зеркального отражения.

Электронные сборки позволяют выявить возможные коллизии и ошибки при соединениях, а средства анимации — исследовать кинематику механизма с учетом сопряжений в подсборках путем проверки соударений. На рис. 3 показан электронный образ механизма выверки визира из комплекта мехатронного прибора. Для визуализации сборочной единицы или изделия используются цветовые гаммы (рис. 4), оптические свойства (прозрачность) и

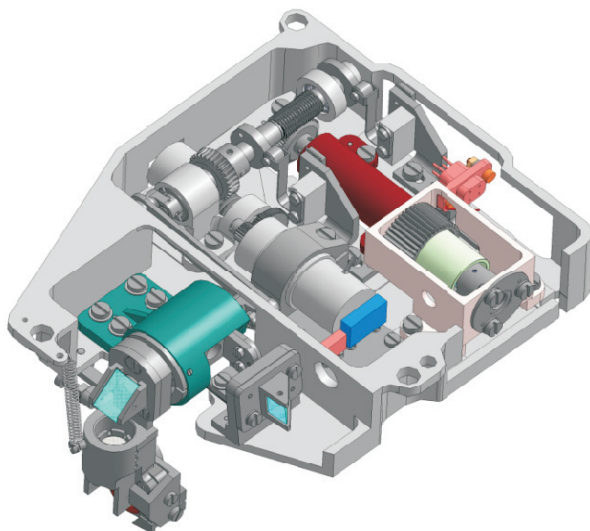


Рис. 4. 3D-прототип под сборки узла мехатронного прибора

различные текстуры, чем достигается эффект фотореалистичности.

Функция САД-платформы имеет режим разнесения сборочных единиц на детали, а отдельные узлы, входящие в состав сборки, могут быть представлены как одним элементом, так и подетально, что проиллюстрировано на рис. 5. Наглядность достигается путем создания сечений и разрезов. Требования к результату — демонстрация последовательности операций при сборке/разборке модулей и возможность быстрого редактирования объекта. Чтобы представить конструкцию в целом, оформляют электронный каталог готового изделия.

При завершении этапа КСП необходимо провести контроль документации через экспертное приложение, в функции которого входит поиск коллизий и неточностей в оформлении электронных моделей изделий и 2D-чертежей. Программный продукт Компас-Эксперт российской фирмы «Аскон» в настоящий момент обеспечивает около 200 проверок на ошибки в исполнении.

**САЕ-автоматизация при сопровождении производства.** Группа инженерных расчетов обеспечивает сопровождение проекта по прочностному анализу, который осуществляется в САЕ-приложениях. Платформа САЕ, реализуя конечно-элементную методологию решения дифференциальных уравнений в частных производных, ориентирована на численный анализ напряженно-деформированного состояния стержневых, пластинчатых, оболочечных и твердотельных конструкций, а также их композиций, выполненных из отдельных 3D-моделей.

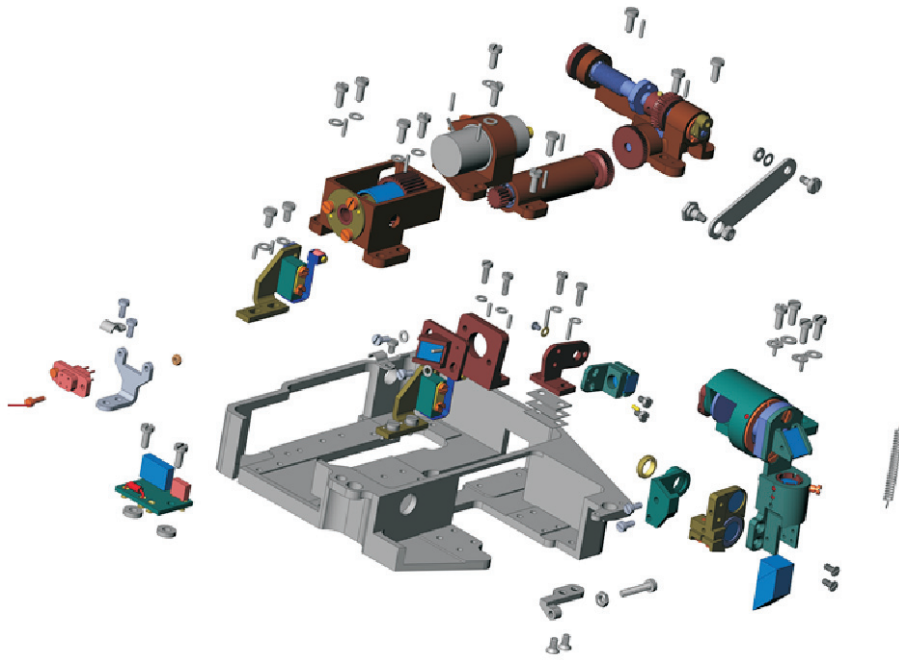


Рис. 5. Разнесенная сборка узла мехатронного прибора

Внешние силовые нагрузки и ограничения могут быть разнообразными как по местоположению, так и по содержанию [13–16]. Инжиниринг позволяет найти на стадии проектирования конструкторские решения, отвечающие требованиям надежности и безопасности при эксплуатации изделия.

Поверочный расчет статического режима напряженно-деформированного состояния дает возможность обнаружить опасные сечения и

зоны с максимальными деформациями в исследуемой детали. Например, для изделия «Ультразвуковой излучатель» необходимо дать рекомендации по сборке этого узла, в ходе которой осуществляется затягивание крепежной шпильки. Это устройство является одним из центральных элементов вспомогательного технологического оборудования по очистке (подготовке) поверхности деталей (комплектующих) от производственных загрязнений.

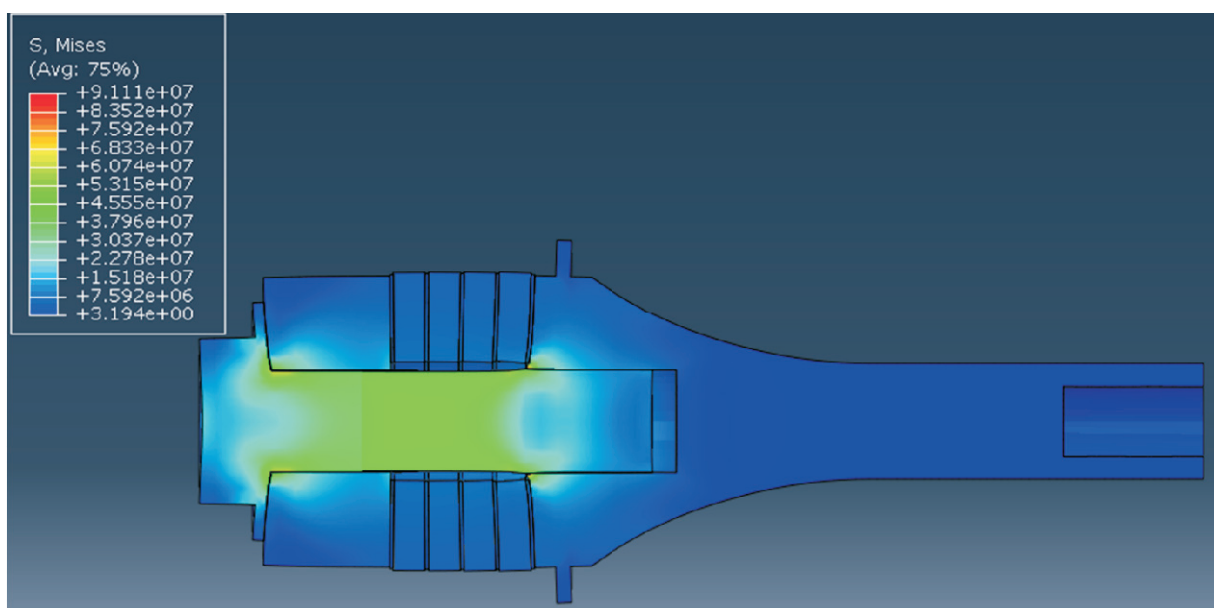


Рис. 6. Результат статического анализа сборки «Ультразвуковой излучатель»

Исследование выполнялось с целью предотвращения разрушения пьезокерамических колец в процессе сборочных операций. В ходе эксперимента к модели прикладывалась сила, имитирующая усилие по затягиванию шпильки, и отслеживались напряжения в теле конструкции.

Цветная легенда, визуализируя результаты симуляции (рис. 6), позволяет сделать выводы о надежности соединения и безопасности ТП сборки, которые подтверждены для изделия опытным путем при назначенном усилии затягивания.

Для изделия «Ультразвуковой излучатель» уже на стадии проектирования необходимо показать достижимость проектного показателя — частоту колебаний преобразователя. Модальный анализ — следующий этап комплексного исследования. Симуляция позволяет определить собственные частоты излучателя в диапазоне 10...30 кГц и выделить те, которые отвечают продольным колебаниям. Характер перемещений отдельных зон в теле излучателя на рабочей частоте (~19 кГц) приведен на рис. 7, а.

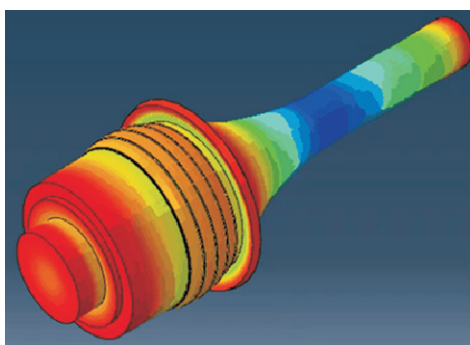
Гармонический анализ позволяет построить амплитудно-частотную характеристику ультразвукового преобразователя при возбуждении волновой системы посредством переменного электрического напряжения, приложенного к пьезокерамическим кольцам. В этом случае возникает обратный пьезоэлектрический эффект, а амплитудно-частотная характеристика (рис. 7, б) показывает, что значение амплитуды колебаний составляет примерно 20 мкм. Результат полностью согласуется с диапазоном рекомендованных значений [17, 18].

Проблему температурных деформаций узлов измерительных механизмов предварительно рассматривают уже на ранней стадии КСП при конфигурировании и выборе материала для изделия. Вопрос продолжают решать и в технологическом разделе, где предусмотрены операции снятия остаточных напряжений в объеме детали. Отсутствие учета этих явлений служит одной из причин возникновения погрешности измерительных устройств, рассчитанных на бесконтактное взаимодействие в широком диапазоне температур.

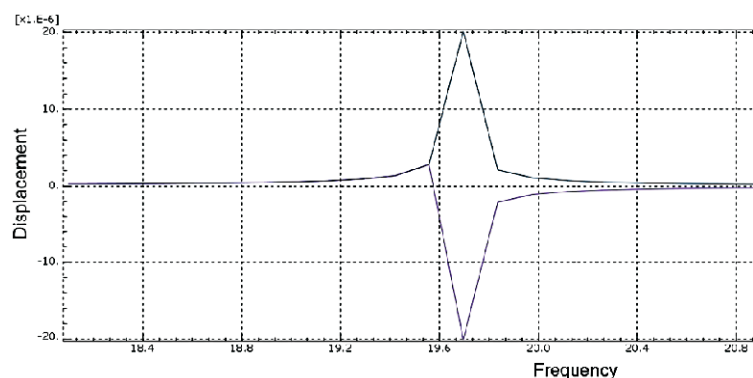
В качестве примера рассмотрим деталь измерительного прибора «Основание», имеющую развитую топологию (рис. 8, а): выступающие и опорные поддержки, технологические и крепежные отверстия. Область А — зона расположения светоформирующих элементов. Вследствие температурных деформаций при колебании температуры в диапазоне  $-50...+50$  °С происходит смещение оптической оси прибора, что является одной из причин недостоверности измерений [8] и требует частой юстировки измерителя.

Командная работа группы конструкторов и расчетного подразделения в условиях жестких требований к конфигурации и геометрии детали позволяет найти решение для минимизации тепловых деформаций и перемещений. С этой целью в зонах наибольших деформаций сформированы ребра жесткости и осуществлен подбор материала заготовки.

Многовариантный поиск приемлемого решения с оценкой температурного влияния на этот элемент конструкции позволил найти компромисс геометрии детали и минимизировать погрешность в работе измерительного канала [8].



а



б

Рис. 7. Результаты модального (а) и гармонического (б) анализов ультразвукового излучателя на частоте 19 679 Гц

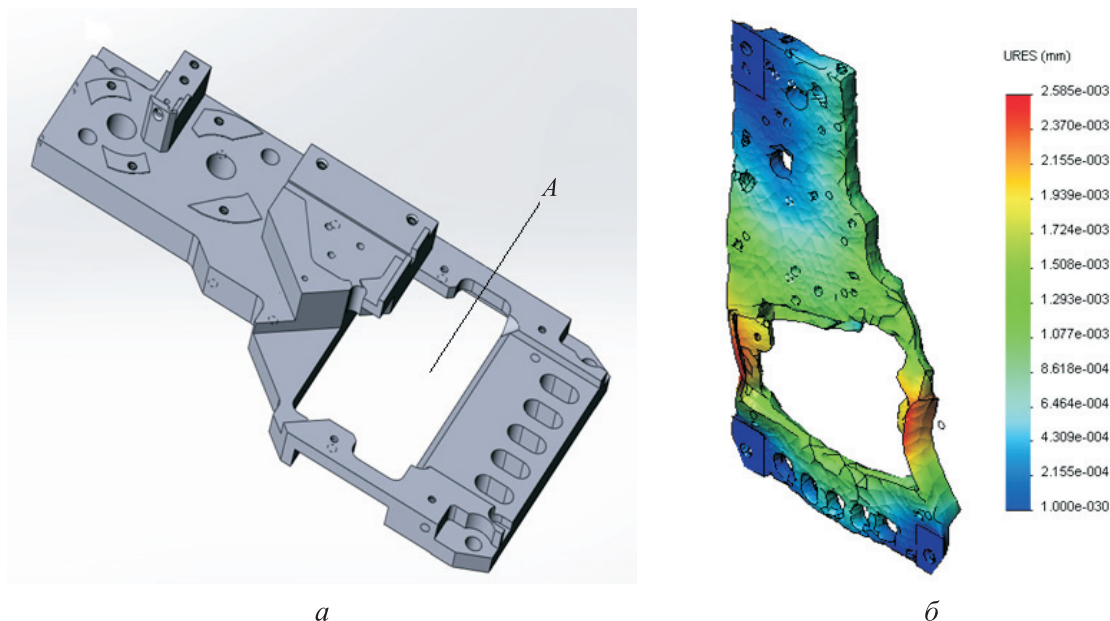


Рис. 8. Модель детали «Основание» (а) и поле деформаций в ней, мм, при охлаждении до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

Из рис. 8, б видно, что максимальное перемещение в сравнении с базовым вариантом (0,057 мм) составило 0,0025 мм (при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Принятое конструктивное решение с дальнейшей термообработкой изделия для снятия остаточных напряжений является результатом согласованного взаимодействия отдельных подразделений.

**Технологии виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальности при сопровождении производства.** Самостоятельным направлением в 3D-моделировании является инжиниринг, основанный на использовании технологий VR/AR, что стимулирует поиск новых дизайнерских и эргономических решений [12, 18].

Находясь в виртуальном пространстве, конструктор взаимодействует с объектом VR/AR и детально анализирует информацию о степени проработанности проекта, получает возможность по уточнению габаритных размеров отдельных узлов. Эта методология позволяет выявить неточности в компоновке, оценить удобство обслуживания и эксплуатации, комфортабельность и безопасность, а также доступность к узлам изделия и ремонтпригодность конструкции.

На рис. 9 показана визуализация фрагмента салона подвижного транспорта, импортированная в систему VRConcept из CAD-платформы. Наличие в системах VR/AR инверсивной кинематики дает возможность детально

контролировать положения частей человеческого тела, а использование систем трекинга выводит на более высокий уровень подготовку и выполнение производственных процессов.

Перспективы VR/AR позволяют при проектировании высокотехнологичных продуктов в максимальной степени исключить стадии натуральных испытаний на макете и повысить уровень безопасности ТП. Появляются инструменты, которые дают возможность предварительно проработать, а затем осуществить

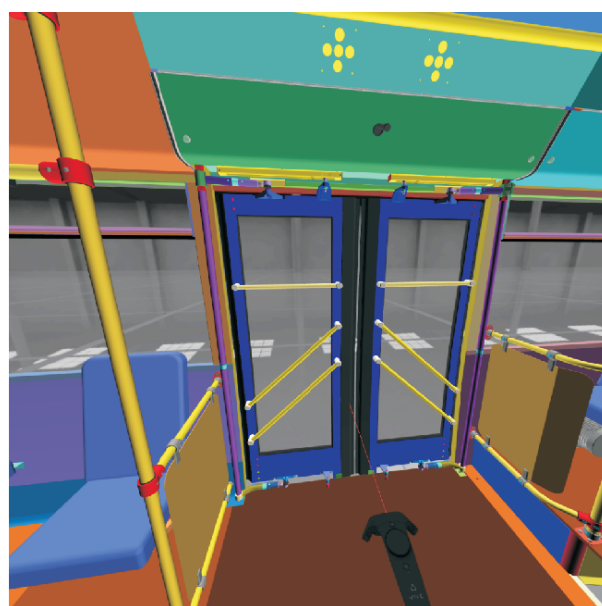


Рис. 9. Виртуальное пространство салона в троллейбусе

активный контроль ответственных операций изготовления и сборки изделия [12, 18]. Одновременное использование в процессе сборочных работ технологий VR/AR и элементов искусственного интеллекта позволит обнаружить и сигнализировать об ошибках в реальном времени.

**САРР-автоматизация при сопровождении производства.** Проектирование технологических маршрутов в САПР ТП — следующая ступень подготовительного периода. К задачам автоматизированного технологического сопровождения производства (ТСП) относятся определение методов и способов обработки деталей, выполнение требований технологичности изготовления изделия и сборки конструкции [6, 8–10].

САРР-платформа с поддержкой нормативно-справочных баз обеспечивает процессы технологического сопровождения и дигитализации документооборота. Этот процесс начинается с момента получения задания на проектирование, продолжается при управлении технологическими изменениями и оформлением заявок на разработку средств технического оснащения (приспособлений, оснастки). Сюда входят разделы по проектированию управля-

ющих программ (УП) для оборудования с ЧПУ и финальный этап сдачи задания.

Поддержка технологической подготовки производства обеспечивается наличием многопрофильных, структурированных и постоянно расширяющихся баз данных [9]. Их накопление и пополнение с целью привязки к конкретному предприятию происходит непосредственно в процессе работы. Распределение ролей для участников проекта с соответствующим уровнем доступа позволяет осуществить первый уровень защиты от несанкционированного проникновения.

САПР ТП обеспечивает:

- многовариантность при проектировании типового/группового ТП;
- выбор станочного парка, инструментария, оснастки, приспособлений, универсального и специализированного измерительных средств;
- расчет режимов металло- и термообработки, гальваники, лакокраски, сборки, сварки;
- расчет себестоимости, нормирование материальных и трудовых затрат;
- создание комплекта технологических документов.

САРР-платформа построена на принципах и условиях коллективного инжиниринга комплексных проектов в реальном времени. Для

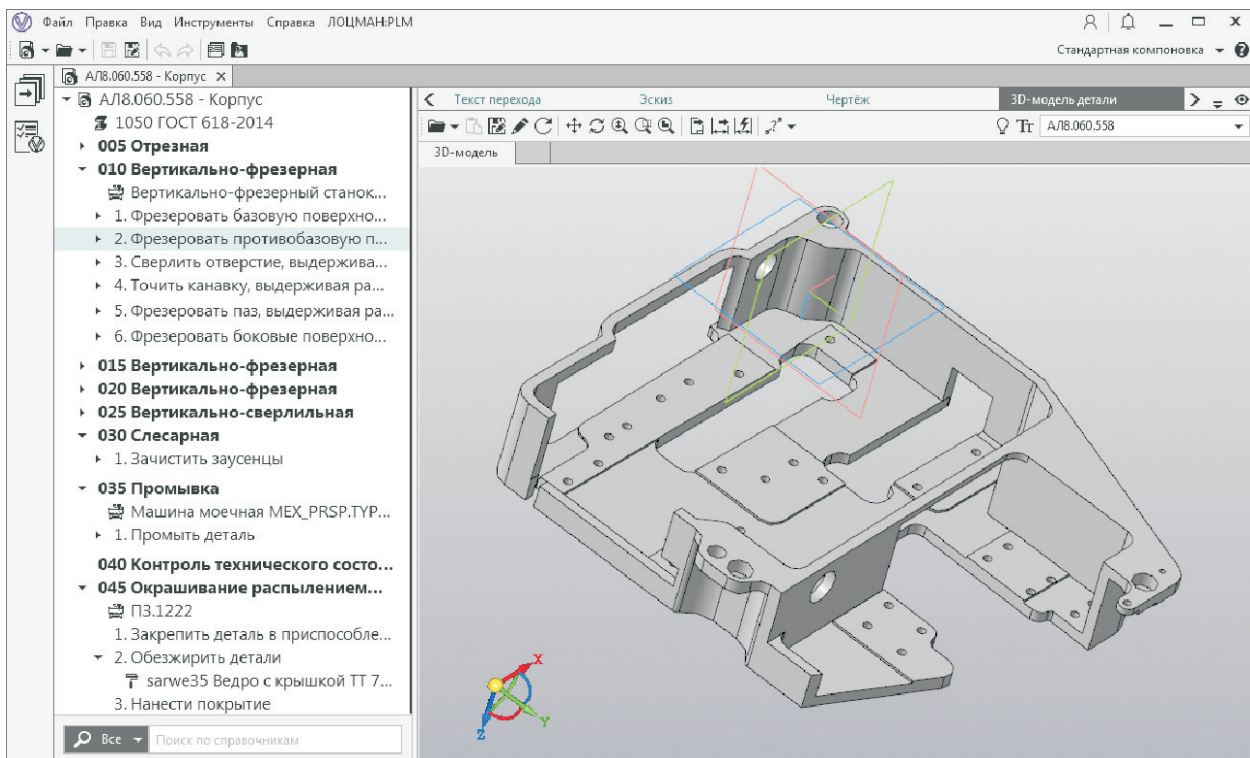


Рис. 10. Технологический маршрут детали «Корпус» в среде ВЕРТИКАЛЬ



созданных объектов реализована ассоциированная связь атрибутов ТП с параметрами графических материалов САД-приложения: эскизов и чертежей. Все изменения атрибутов в графических материалах приводят к модификациям связанных параметров ТП.

Допускается возможность и обратного характера — обновление атрибута в графическом документе, как ответ на правки в ТСП [9]. Например, в автоматическом режиме осуществляется перерасчет отклонений, классов допусков и других зависимых величин как отклик на корректирование номинала параметра. На рис. 10 показан технологический маршрут изделия «Корпус» из состава узла мехатронного прибора и связанная с ним последовательность операций.

Автоматизированная технологическая подготовка производства позволяет выбрать станочное оборудование и его количество, привести перечень инструментов и оснастки, сопроводив этот список операционным эскизом детали. Это дает возможность провести эффективный инструментальный контроль как на стадии выполнения, так и по завершении перечня всех операций.

На принципе многоуровневой структуры из операций и переходов, оборудования и оснастки, а также необходимых технологических объектов образуется дерево ТП. В ходе разработки ТП детали/сборочной единицы формируется структурированная информация с различными уровнями, где отображаются все основные элементы ТСП: данные об изделии (3D-модель, чертежи, спецификации и др.), маршруты обработки и выполнения операции. Это позволяет быстро комбинировать с объектами ТП, реализуя требуемую технологию обработки детали/сборочной единицы, электронных моделей изделий которой всегда является корневым элементом дерева ТСП.

В ходе ТСП определяются численность и состав персонала, требования к его квалификации, а также указываются сопровождающие атрибуты, необходимые для достижения планируемых производственных показателей [6, 8–10]. На базе САРР-платформы участники проекта разрабатывают технологические процессы всех видов: единичный, типовой/групповой и сборки изделия.

**САМ-автоматизация при сопровождении производства.** При выполнении бизнес-про-

цесса возникает необходимость в проектировании УП для оборудования с цифровым кодом управления. Технолог-программист, получив задание на разработку УП для станков с ЧПУ, приступает к его выполнению, используя модуль автоматизированной системы САМ [6, 8, 9, 19, 20].

Исходными данными служит электронный чертеж (3D-модель детали), а разработчик определяет поверхности и геометрические элементы, необходимые для обработки. Для деталей сложной геометрии существует несколько стратегий определения оптимальных траекторий инструмента: минимальные износ инструмента и затраты по времени обработки, а также другие факторы, что имеет значение при работе на станках со сложными движениями.

Приложение генерирует цифровой код в промежуточный CL-файл, содержащий данные о траектории движения инструмента и технологических командах. Постпроцессор определенного типа станка с ЧПУ преобразует этот документ в УП согласно конкретной кинематической схеме устройства. Таким образом, любые типы оборудования (многокоординатный фрезерный, токарно-фрезерный, токарный, электроэрозионный, обрабатывающие центры, станки плазменной резки) могут быть настроены и подготовлены соответствующим постпроцессором с помощью исходного CL-документа [6–9, 19, 20].

Функционал САМ-приложения обеспечивает проверку созданного программного G-кода, симулируя формообразование детали из заготовки. Визуализация процесса механообработки предполагает имитацию и контроль траектории режущего инструмента с учетом перемещений

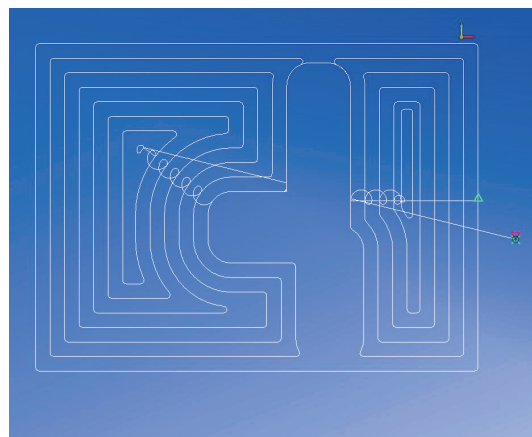


Рис. 11. Траектория движения фрезы при обработке детали «Основание» в среде MasterCam

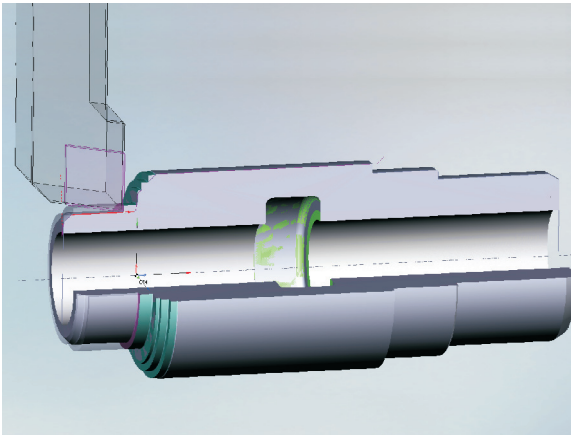


Рис. 12. Симуляция обработки детали «Вал» в среде SprutCAM

исполнительных, вспомогательных органов и зон ограничений. Таким образом, технолог видит в каждый момент времени актуальное состояние заготовки, выявляя возможные столкновения и коллизии, контролируя вылет инструмента и получая отображение времени (с учетом промежуточных перемещений).

В качестве примера на рис. 11 приведена траектория (HSM-технология) движения инструмента при фрезерной обработке на обрабатывающем центре детали «Основание». На рис. 12 проиллюстрирована симуляция обработки детали «Вал».

**Дигитализация документооборота при сопровождении производства.** По окончании разработки ТП в автоматическом режиме формируется сводная информация по базовой и дополнительной документации. Для этого в структуре системы имеются шаблоны в формате требований ЕСТД и ЕСКД (рис. 13). К основной информации относятся: планово-экономические, организационные и технологические мероприятия, операции и маршруты изготовления деталей (технологические карты), требования к ремонту и обслуживанию. Вспомогательные данные — документы, необходимые для определения новых ТП и операций, акты внедрения ТП (аддитивные технологии), карты заказов на разработку оснастки, различные ведомости и др.

В разделе «Отчеты» подготовлены итоговые формы требуемой сложности и реализованы алгоритмы поиска информации для ее локализации в документации по требованиям заказчика. Функционал плагина осуществляет сопровождение и управление требованиями и изменениями актуальности технологической информации, пополнение базы типовых/групповых ТП. Это позволяет использовать однократно заполненные сведения о ТП в последующей работе при проектировании схожих технологических программ.

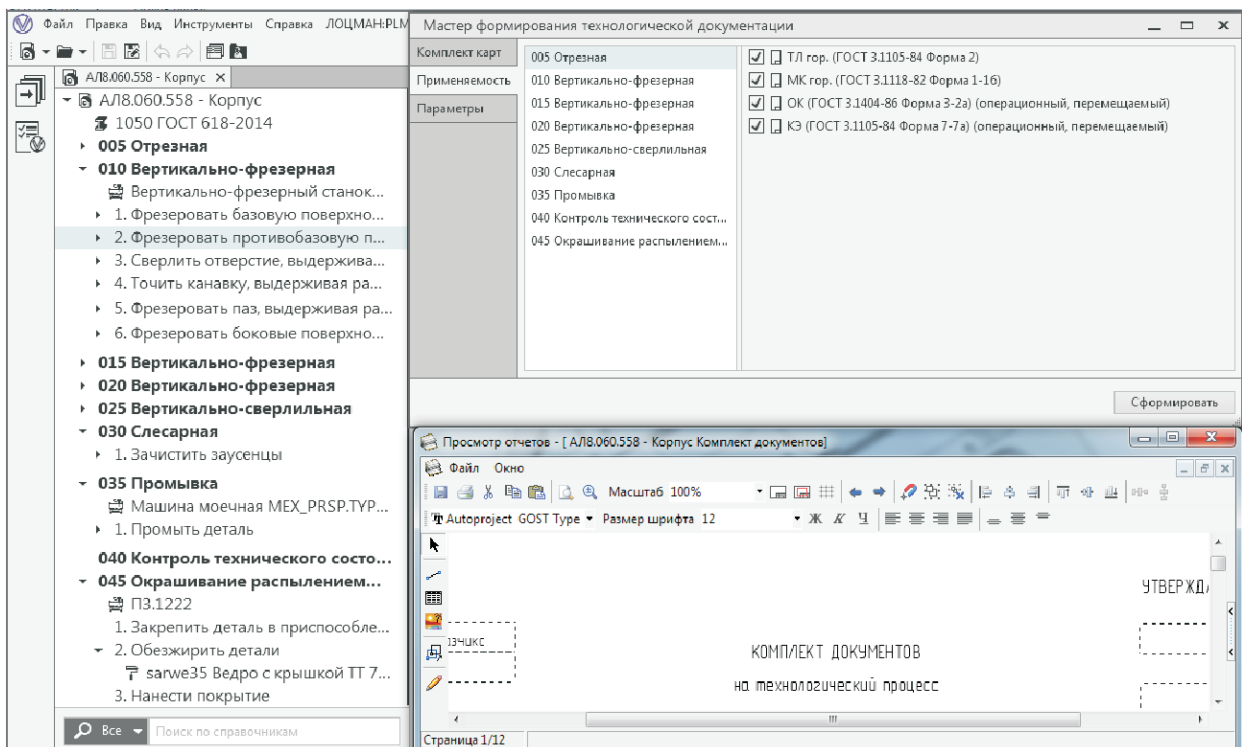


Рис. 13. Скриншот фрагмента формирования пакета технологической документации в среде ВЕРТИКАЛЬ

Пакет документов о проекте включает в себя как данные по отдельным ТП изделий, так и сводную технологическую отчетность по всем частям проекта. В его состав входят различные ведомости, специфицированные нормы расхода материалов и технологические маршруты. Модуль «Отчеты» обеспечивает формирование комплекта технологической документации в MS Excel по государственному стандарту, автоматическое внедрение операционных эскизов и графического материала разнообразных форматов [6, 9].

**Интеллектуализация и дигитализация производства.** Непрерывный поток инженерных данных, формируемых в системах CAD/CAPP/CAM/CAE/CAO, выступает как результат дигитализации отдельных информационных полей и объединения их в единое цифровое пространство. Технологии и алгоритмы функционирования внутри платформ и во взаимодействии между ними определяются как интеллектуализация производственной деятельности. Таким образом, под термином «интеллектуализация производства» в широком смысле понимают использование элементов искусственного интеллекта (на первоначальном этапе) и переход в перспективе к глубокому применению на уровень киберфизических систем [1–3].

К элементам искусственного интеллекта (машинного интеллекта) следует отнести предиктор-корректорную аналитику экспертных систем (на основе концепции BIG DATA), методы компьютерной и вычислительной геометрии, дискретной дифференциальной геометрии (платформы CAD/CAM/CAE/CAO), алгоритмы оптимизации и решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (системы CAE/CAO), эвристические подходы, основанные на интеллектуальном поиске стратегий решения.

Линейки российских продуктов программного обеспечения, созданных компаниями «Ас-кон», НТЦ «АПМ», консорциумом «Развитие», фирмой «СПРУТ-Технологии», охватывают значительный круг проектных и управленческих задач машиностроительной области. Инженерный и технологический разделы непрерывно дополняются приложениями и предоставляют в релизах новые комплексы расширенного интегрированного инструментария, увеличивая спектр практических возможностей. Такое направление следует рассматривать как устой-

чивую тенденцию в интеллектуализации программного обеспечения и продолжение политики импортозамещения в производстве.

В узком смысле понятие «интеллектуализация производства» определяет перечень компетенций, необходимых для участия в современном производстве. Это может быть реализовано только при наличии высококвалифицированных сотрудников и одновременно ставит задачи их подготовки и обучения в соответствующих учебных центрах.

**Интеллектуализация управления производством.** Передача информации о выполненной КТПП для продолжения бизнес-процесса осуществляется через сетевое взаимодействие в локальную папку (облачное хранилище) или средства PDM/MES (PLM/ERP) в зависимости от уровня организации и численности предприятия. Интеграция этих стратегий концентрирует все инженерные данные о проекте через инструментальное обеспечение и информационную систему управления производством в единый цифровой поток.

Как организационно-техническая система PDM обеспечивает управленческий сектор информацией о продуктах предприятия, взаимодействие подразделений и доступ к результатам на всех циклах разработки/изготовления. К ключевым функциям модуля системы PDM относятся управление: документацией САПР и архивацией; инженерными решениями, графическими объектами; номенклатурой продуктов; клиентскими заказами и логистикой и т. д.

Средства управления производством MES позиционируются как оперативно-календарная система внутрицехового планирования, диспетчеризации, контроля и учета межоперационных заделов, т. е. фокусируются на текущих вопросах координации производства. Оперирова актуальными данными о производственных процессах, средства управления производством MES позволяют скорректировать производственное задание и текущую информацию в реальном времени (неоднократно за рабочую смену), что целесообразно для систем ERP [21–23].

MES-инструменты ориентированы на текущее управление и контроль мелкосерийного, единичного и позаказного производства. Для серийного и массового производства планирование целесообразно вести на уровне возможностей ERP-систем. Роль MES — связующее звено между управлением ТП и ERP-системой.

Более комплексный функционал обеспечивают PLM-системы, включающие в себя PDM как подуровень. Помимо опций управления изделиями PLM-системы предоставляют дополнительные модули контроля финансами, персоналом и другими возможностями. В систему сопровождения жизненного цикла входят следующие блоки:

- исследования рынка;
- транзакционных операций;
- проектирования и планирования создания продуктов;
- закупки комплектующих и выходного/входного контроля;
- упаковки, хранения, продаж и утилизации;
- технического, информационного и эксплуатационного обеспечения;
- взаимодействия и интеграции различных систем в единое информационное окружение.

Использование функционала PLM/ERP актуально для предприятий машиностроения с большой степенью кооперации и территориально удаленными подразделениями (поставщиками). Цель — масштабирование решений, выстраивание логистики сотрудничества и комплексное уменьшение издержек при объединении таких задач в единый блок.

Функционал платформ PLM/ERP способен отслеживать единичные экземпляры продукции и учитывать индивидуальные требования. Если система PLM координирует взаимодействие структурных подразделений и механизмы согласований, извещений и утверждений, то система ERP нацелена на исполнение заказов, средне- и долгосрочное планирование.

В состав функций этой системы входят все функции MRP II, модули планирования и моделирования финансов и маркетингового обес-

печения, управления производством и поставками, ресурсами и потребностями. Отдельные модули ориентированы на специализированные сферы деятельности или конкретный бизнес-процесс [21–23]. При отсутствии необходимости в кардинальных и долгосрочных решениях можно ограничиться только PDM/MES-решением.

## Выводы

1. Виртуальная кооперация конструкторских и технологических подразделений дает возможность объединить процедуры автоматизированного проектирования CAD/CAM/CAPP/CAE/CAO со средствами управления производством PDM/MES и выстроить логистику их взаимодействия.

2. Внутренний контур управления PDM/MES позволяет контролировать производственный процесс в реальном времени и вырабатывать обоснованные решения в условиях быстроменяющейся конъюнктуры. К функциям внешнего — PLM/ERP относится обеспечение логистики и устойчивости управления всей цепочки распределенных подразделений, в состав которых входят и малые предприятия.

3. Цифровое сопровождение производства дает эффект увеличения скорости проектирования и повышает качество выполненных проектов, что приводит к усилению интеллектуализации в компетенциях сотрудников компаний. Наличие цифрового отображения выводит на новую ступень содержание подготовки и управления производством, формируя новые вызовы при переходе на наукоемкие и высокотехнологичные виды продукции.

## Литература

- [1] *Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии*. Москва, Московская школа управления Сколково, 2017. URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11\\_november/17/tsifrovoe\\_proizvodstvo\\_112017.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf) (дата обращения: 07.12.2020).
- [2] Боровков А.И., Рябов Ю.А. Перспективные направления развития передовых производственных технологий в России. *Мат. XVII Апрельской межд. 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] Schuh G., Anderl R., Gausemeier J., et al. *Industrie 4.0 maturity index*. Munich, Herbert Utz, 2017.
- [5] Xu W., Cooper A., et al. *Concomitant digitalization effect. Measuring the real impact of the digital economy*. In: *Presentation by Huawei and Oxford Economics*. 2017. URL:

- [https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci\\_digital\\_spillover.pdf](https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci_digital_spillover.pdf)  
(дата обращения: 07.12.2020).
- [6] Булавин В.Ф., Яхричев В.В., Степанов А.С. Политика цифровых технологий на малых машиностроительных предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 9, с. 35–45, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-9-35-45>
- [7] Кошутин Д.В. Виртуальное предприятие на основе plm-системы «Лоцман» в виде многоагентной системы. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, 2020, т. 47, № 2, с. 75–85, doi: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2020-47-2-75-85>
- [8] 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>
- [9] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. и др. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. II. Технологический этап. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2020, т. 63, № 3, с. 250–256, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-250-256>
- [10] Булавин В.Ф., Яхричев В.В. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли. *САПР и графика*, 2018, № 6, с. 52–55.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Инженерный анализ и новые технологии в методе конечных элементов. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2018, № 2, с. 109–120.
- [14] Алямовский А.А. *Инженерные расчеты в Solid Works Simulation*. Москва, ДМК-Пресс, 2010. 464 с.
- [15] Замрий А.А. *Практический учебный курс. CAD/CAE система ARM WinMachine*. Москва, ДМК-Пресс, 2007. 144 с.
- [16] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев С.С. и др. *Ультразвук. Аппараты и технологии*. Бийск, Бия, 2015. 688 с.
- [17] Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Шалунов А.В. и др. *Ультразвук. Воздействие на системы с несущей жидкой фазой*. Бийск, Изд-во АлтГТУ, 2018. 276 с.
- [18] 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>
- [19] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Stepanov A.S. Digital space of small enterprises in engineering. *Proc. ICIE 2020*. Springer, 2021, pp. 462–468.
- [20] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev 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>
- [21] Ширяев Н. PLM/PDM/ERP: реалии и перспективы. *САПР и графика*, 2007, № 12, с. 16–20.
- [22] Личман А. Интеграция PLM и ERP: Выбор пути. *Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка)*, 2013, № 3, с. 84–85.
- [23] Бабкин А.В., ред. *Цифровизация экономических систем: теория и практика*. Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2020. 796 с.

## References

- [1] *Tsifrovoe proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii* [Digital production. Methods, ecosystems, technologies]. Moscow, Skolkovo Moscow School of Management, 2017. URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11\\_november/17/tsifrovoe\\_proizvodstvo\\_112017.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf) (accessed: 07.12.2020) (in Russ.).

- [2] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Advanced manufacturing technologies in Russia: outlines of a new policy]. *Mat. XVII Aprel'skoy mezhd. nauch. konf. po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva. T. 3* [Proc. XVII Int. Sci. Conf. on Problems of Economy and Society Development. Vol. 3]. Moscow, VShE Publ., 2017, pp. 381–389.
- [3] Borovkov A., Ryabov Yu. On “Technet” road map (advanced manufacturing technologies) of national technology enterprise. *Tramplin k uspekhu*, 2017, no. 10, pp. 8–11. (In Russ.).
- [4] Schuh G., Anderl R., Gausemeier J., et al. *Industrie 4.0 maturity index*. Munich, Herbert Utz, 2017.
- [5] Xu W., Cooper A., et al. Concomitant digitalization effect. Measuring the real impact of the digital economy. In: Presentation by Huawei and Oxford Economics. 2017. URL: [https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci\\_digital\\_spillover.pdf](https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci_digital_spillover.pdf) (accessed: 07.12.2020).
- [6] Bulavin V.F., Yakhrichiev V.V., Stepanov A. Policy of digital technologies in small machine-building enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 9, pp. 35–45, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-9-35-45> (in Russ.).
- [7] Koshutin D.V. Virtual enterprise based on the Lotsman PLM SYSTEM as a multi-agent system. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences], 2020, vol. 47, no. 2, pp. 75–85, doi: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2020-47-2-75-85> (in Russ.).
- [8] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yakhrichiev 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.).
- [9] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yakhrichiev V.V., et al. Digital format for preparation of instrument production. Part II. Technological stage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2020, vol. 63, no. 3, pp. 250–256, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-250-256> (in Russ.).
- [10] Bulavin V.F., Yakhrichiev V.V. Digital technologies in small business of machine building industry. *SAPR i grafika*, 2018, no. 6, pp. 52–55 (in Russ.).
- [11] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yakhrichiev V.V. Validation of CAD products in small enterprises machinery sector. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2017, no. 5, pp. 64–72 (in Russ.).
- [12] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yakhrichiev 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: Russia Forsite. Proc. Sci.-Tech. Pract. Conf.]. Sankt-Peterburg, Politekh-Press, 2020, pp. 28–40.
- [13] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yakhrichiev V.V. Engineering analysis and new technologies in the finite element method. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 2, c. 109–120 (in Russ.).
- [14] Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v Solid Works Simulation* [Engineering analysis in Solid Works Simulation]. Moscow, DMK-Press Publ., 2010. 464 p.
- [15] Zamriy A.A. *Prakticheskiy uchebnyy kurs. CAD/CAE sistema ARM WinMachine* [Practical educational course. CAD/CAE ARM WinMachine system]. Moscow, DMK-Press Publ., 2007. 144 p.
- [16] Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., et al. *Ul'trazvuk. Apparaty i tekhnologii* [Ultrasound. Devices and technologies]. Biysk, Biya Publ., 2015. 688 p.
- [17] Golykh R.N., Khmelev V.N., Shalunov A.V., et al. *Ul'trazvuk. Vozdeystvie na sistemy s nesushchey zhidkoy fazoy* [Ultrasound. Impact on systems with liquid carrier phase]. Biysk, Izd-vo AltGTU Publ., 2018. 276 p.
- [18] 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>
- [19] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Stepanov A.S. Digital space of small enterprises in engineering. *Proc. ICIE 2020*. Springer, 2021, pp. 462–468.

- [20] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev 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>
- [21] Shiryaev N. PLM/PDM/ERP: reality and prospects. *SAPR i grafika*, 2007, no. 12, pp. 16–20.
- [22] Lichman A. Integration of PLM and ERP: choice of method. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov (metalloobrabotka)*, 2013, no. 3, pp. 84–85.
- [23] Babkin A.V., ed. *Tsifrovizatsiya ekonomicheskikh sistem: teoriya i praktika* [Digitalization of economic systems: theory and practice]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2020. 796 p.

Статья поступила в редакцию 05.04.2020

## 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: tamarabulavina53@gmail.com).

**КОШУТИН Дмитрий Валерьевич** — старший преподаватель кафедры «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: koshutindv@mail.ru).

**ЯХРИЧЕВ Виктор Васильевич** — старший преподаватель кафедры «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: yahrachev@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: tamarabulavina53@gmail.com).

**KOSHUTIN Dmitry Valerievich** — Senior Lecturer, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 15, e-mail: koshutindv@mail.ru).

**YAHRICHEV Victor Vasilievich** — Senior Lecturer, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 15, e-mail: yahrachev@yandex.ru).

**STEPANOV Alexander Sergeevich** — Candidate of Science (Eng.), Head of 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., Кошутин Д.В., Яхричев В.В., Степанов А.С. Цифровая трансформация технологического сопровождения производства в малых предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 9, с. 15–29, doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-15-29

### Please cite this article in English as:

Bulavin V.F., Bulavina T.G., Koshutin D.V., Yahrachev V.V., Stepanov A.S. Digital Transformation of Technological Support of Production in Small Enterprises. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 9, pp. 15–29, doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-15-29