

УДК 681.5

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-576-583

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЬНОГО ПОДХОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

К.В. Зименко, М.Я. Афанасьев, М.В. Колесников

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: zksenia@yahoo.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 08.06.20, принята к печати 26.06.20  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Зименко К.В., Афанасьев М.Я., Колесников М.В. Применение модульного подхода при разработке программного обеспечения для оборудования с числовым программным управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 576–583. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-576-583

### Аннотация

**Предмет исследования.** В работе предложен подход к разработке ядра системы числового программного управления, который подразумевает формирование программного обеспечения из отдельных модулей-блоков, взаимодействующих по унифицированному программному интерфейсу с высоким уровнем детализации, что позволит получить требуемую систему в короткие сроки. Рассмотрена возможность применения доступных открытых систем числового программного управления в качестве основы, что позволит еще больше сократить сроки проектирования. Разработка системы числового управления рассматривается в контексте ее применения на универсальном модульном оборудовании. **Метод.** Предлагаемое решение основано на многопротокольной системе управления и обеспечивает возможность объединения программных и аппаратных компонентов разных производителей. Также обеспечивается независимость от конкретной платформы. Данная методика позволяет быстро формировать требуемую систему числового программного управления для любого типа обработки или других операций согласно требованиям аппаратной части, а также оставляет широкие возможности для дальнейших модификаций, повышающих эффективность работы оборудования. **Результаты.** В рамках практической части работы получена программная библиотека планирования траектории инструмента, включающая анализ геометрии, контроль скорости и интерполяцию. Команды для управления выходами и состоянием входов интегрированы в циклические данные управления приводом и передаются через единый интерфейс. Все полученные модули сформированы независимо, что позволяет встраивать их в другие системы с открытым кодом, а также в дальнейшем модифицировать их для повышения эффективности обработки. **Практическая значимость.** Работа направлена на повышение экономической независимости малых проектных организаций и предприятий. Предложенный модульный подход в короткие сроки позволит создавать требуемое программное обеспечение для применения его на универсальном модульном оборудовании, что существенно расширит возможности быстрого прототипирования и обеспечит оперативное создание опытных партий.

### Ключевые слова

числовое программное управление, модульность, модульный подход, интерполяция, контроль скорости, планирование траектории, система с ЧПУ

### Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-576-583

## MODULAR APPROACH APPLICATION IN DEVELOPMENT OF COMPUTER NUMERICAL CONTROL SOFTWARE

K.V. Zimenko, M.Ya. Afanasev, M.V. Kolesnikov

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: zksenia@yahoo.com

### Article info

Received 08.06.20, accepted 26.06.20  
 Article in Russian

**For citation:** Zimenko K.V., Afanasev M.Ya., Kolesnikov M.V. Modular approach application in development of computer numerical control software. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 576–583 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-576-583

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper proposes an approach to the development of a numerical control kernel. The approach implies creating software from separate modules interacting via a unified programming interface with a high level of granularity. Thus, a system with a required configuration can be developed in a relatively short time. The study also considers the possibility of using open source computer numerical control systems as a basis, which will further reduce the design time. The approach for computer numerical control development is considered in the context of its application on multipurpose modular equipment. **Method.** The proposed solution is based on a multi-protocol control system and combines software and hardware components from different manufacturers. Platform independence is also provided. This method allows a prompt development of the numerical control system for any type of processing or other operations according to the requirements of hardware, and also gives wide opportunities for further modifications that increase the equipment efficiency. **Main Results.** The practical result obtained is a software trajectory-planning library, including geometry analysis, feed rate control and interpolation. Commands for controlling outputs and status of inputs are integrated into the cyclic data of the drive control and transmitted via the same interface. All developed modules are independently designed and can be embedded into other open source systems, as well as be further modified for processing efficiency increase. **Practical Relevance.** The work is aimed at increasing the economic independence of small design organizations and enterprises. The proposed modular approach allows the development of a required numerical control system for multipurpose modular equipment in a short time, and will significantly expand the capabilities of rapid prototyping and ensure the prompt production of pilot batches.

**Keywords**

computer numerical control, modular approach, modular equipment, interpolation, feed rate control, trajectory planning, computer numerical control system

**Acknowledgements**

The work was carried out under the project No. 619296 “Development of methods for creation and implementation of cyberphysical systems”.

**Введение**

Одна из главных проблем, с которой сталкиваются малые проектные организации и конструкторские бюро, не имеющие собственных производственных мощностей, — разработка прототипов и опытных партий.

Чаще всего такие организации вынуждены обращаться к сторонним производителям, однако это решение приводит к увеличению сроков, а также стоимости изготовления. А так как отличительной чертой рассматриваемых проектных бюро является создание инновационных продуктов при минимальных сроках проектирования и вывода на рынок, то скорость разработки прототипов оказывает существенное влияние на успех проекта.

Другое возможное решение включает закупку требуемого оборудования и создание собственного производственного участка. Однако, в силу современных тенденций в области приборостроения, а также развития и внедрения концепции промышленного интернета вещей, большинство проектируемых изделий обладает сложной геометрией, а также электронными компонентами. Все это требует применения дорогого специализированного оборудования, закупка которого может оказаться невыгодной. Это решение также нецелесообразно в силу быстро меняющейся номенклатуры.

Оптимальным решением проблемы может стать применение модульного оборудования, которое позволяет получать требуемую установку путем замены отдельных физических модулей. Таким способом малое предприятие может добиться требуемого уровня экономической независимости и получать опытные образцы в короткие сроки без привлечения сторонних организаций и с минимумом затрат.

Следует учитывать, что, так как модульная установка обеспечивает возможность различных видов обработки, то для успешной работы такого оборудо-

вания требуется система числового программного управления (ЧПУ), которая подходила бы для каждого типа обработки. Применение специализированных коммерческих систем ЧПУ для каждого типа установки так же, как и закупка оборудования, нецелесообразно. Возможности систем с открытым исходным кодом (GRBL, Smoothieware), с другой стороны, ограничены фрезерной, лазерной обработкой и трехмерной печатью. А значит, для работы других видов оборудования требуется разработка отдельных систем. Наконец, создание систем управления для каждого типа обработки отдельно существенно увеличит сроки разработки. Следовательно, главным подходом в данном случае является универсальность.

Для решения этой проблемы предлагается применение модульного подхода, когда все основные функции системы с ЧПУ разрабатываются как отдельные программные модули, взаимодействующие по унифицированному программному интерфейсу (Application Programming Interface, API). Ядро системы, отвечающее за планирование движения рабочего органа, также представляется в виде набора модулей.

Таким образом, можно добиться следующих преимуществ:

- обеспечение работы различных видов модульных установок по требованию путем формирования системы с ЧПУ из требуемых модулей;
- возможность постоянного улучшения и модификации системы путем замены модулей, влияющих на эффективность обработки.

Цель работы — получение части ядра системы с ЧПУ, отвечающей за планирование траектории, на основе модульного подхода для применения его на универсальном модульном оборудовании. В работе рассмотрена возможность использования открытых систем с ЧПУ в качестве основы. Задачей на данном этапе является получение планировщика движения для фрезерной

и лазерной обработки таким образом, чтобы обеспечить возможность импорта разработанных модулей в существующую систему с ЧПУ с открытым кодом.

### Обзор предметной области

В настоящий момент идут активные разработки методики по созданию универсального оборудования, которое могло бы включать в себя как возможности аддитивных установок и машин механической обработки, так и других единиц вспомогательного оборудования.

Среди имеющихся разработок универсального оборудования для получения прототипов можно указать объединение станков быстрого прототипирования (Rapid Prototyping, RP), представляющего собой трехмерный принтер, и оборудования для фрезерной обработки [1–3]. Также имеются разработки по объединению лазерной и фрезерной обработки в одной установке [4]. Например, была предложена схема объединения системы с ЧПУ для получения гибридного оборудования трехмерной печати по технологии моделирования методами наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM) и трехосевой фрезерной обработки [5]. Однако, так как ни аппаратная, ни программная части не получены с применением модульного подхода, в данном случае возможность расширения программного обеспечения (ПО) для управления другими типами обработки невозможна.

Возможности рассматриваемого в работе модульного оборудования позволяют создавать помимо установок для субтрактивного и аддитивного производства также роботов, машины для сортировки и маркировки и другие единицы техники. Очевидно, что в силу того, что органы станка переустанавливаются и жестко не закреплены, точность обработки оказывается ниже, чем при применении специализированного оборудования. Так как основная цель создания прототипа — показать общую работоспособность изделия, то возможностей модульной установки оказывается достаточно.

Требования к системе с ЧПУ для модульного оборудования соотносятся напрямую с основными направлениями разработок в данной области и включают в себя сокращение цикла разработки путем обеспечения кроссплатформенности, применения открытой архитектуры, компонентного подхода и возможности повторного использования кода [6–8].

Предложен подход масштабирования каналов управления при движении данных, что позволяет сократить время интерполяции и цикла программируемого логического контроллера, направленный на многоосевую обработку [6]. Все это приводит к ускорению обработки данных в ЧПУ. Однако данный подход не поддерживает масштабируемость в плане применения полученной системы с ЧПУ для другого вида обработки, кроме многоосевого фрезерования.

Наиболее близким к предлагаемому решению является полученное авторами в работе [9] кроссплатформенное ядро ЧПУ, адаптирующееся под многоосевую обработку. Также в [10] предлагается модель системы управления сборочной роботизированной системы с возможностью настройки работы под требуемую физи-

ческую конфигурацию. В данном случае ядро системы управления представляет собой единый модуль, однако, сам состав ядра является черным ящиком, а модификация методов планирования траектории и интерполяции невозможна.

Предлагаемое в настоящей работе решение включает возможность формирования ядра системы с ЧПУ из отдельных модулей-блоков с унифицированными входными данными. При решении данной проблемы необходимо определить требуемый уровень детализации (granularity) системы [11]. Определение оптимального уровня детализации влияет на всю архитектуру системы, что связано с модульностью или интеграцией ее конструкции [12, 13]. При минимальном уровне система представляет собой единый блок, что не подразумевает модульность. При максимальном уровне детализации каждый малый компонент системы обрабатывается индивидуально, что приводит к чрезвычайно мелкозернистой системе и неинтегрированной конструкции [13]. Например, в настоящей работе на высоком уровне детализации программный код представляет собой единый модуль планирования движения, а на самом низком уровне находятся модули, отвечающие за анализ геометрии, контроль скорости и интерполяцию.

Данное решение позволяет не только подстроить систему с ЧПУ под требуемое оборудование, но и обеспечивает постоянное повышение эффективности обработки путем импорта и модификации модулей ядра ЧПУ, отвечающих за точность движения.

Следует учитывать, что данный подход имеет определенные ограничения применения. В работе основная рассматриваемая область применения метода включает универсальные модульные платформы технологического оборудования, а также установки, использующие системы с ЧПУ с открытым исходным кодом.

### Модульный подход при разработке системы с ЧПУ

Возможности модульного оборудования широкие и позволяют путем замены физических модулей получить разные установки и станки. Потенциал не ограничивается фрезерной, токарной, сверлильной и лазерной обработкой: возможно построение принтера для трехмерной печати, маркировщика, сортировщика, промышленного робота и т. д. Работа всех типов установок управляется системой с ЧПУ.

С функциональной точки зрения ЧПУ состоит из блока человеко-машинного интерфейса (Man Machine Interface, MMI), блока ядра числового управления (Numerical Control Kernel, NCK) и блока управления (Programmable Logic Control, PLC) [14]. MMI представляет собой интерфейс между ЧПУ и пользователем, который выполняет команды управления станком, отображает его состояние и предлагает функции для редактирования управляющих программ (УП) обработки детали. Блок PLC последовательно контролирует скорость вращения шпинделя станка, смену детали, инструмента и обработку входных/выходных сигналов и играет роль управления поведением станка, за исключением сервоуправления.

Наконец, ядро системы ЧПУ интерпретирует УП и выполняет интерполяцию, управление положением и компенсацию ошибок. Данный блок приводит в движение и контролирует сервоприводы. В работе рассмотрен вопрос разработки ядра системы ЧПУ.

В составе ядра системы с ЧПУ можно выделить функции интерпретации УП, планирования траектории инструмента, технологические модули, а также модули обратной связи и кинематического преобразования.

Очевидно, что для каждого типа оборудования требуются свои специфические функции, которые должна выполнять система управления. На рис. 1 представлен пример состава модулей планирования траектории для лазерной, фрезерной обработки и трехмерной печати. Для каждого типа обработки предпочтительны определенные наборы модулей. Так как применение сложных траекторий в большей степени характерно для лазерной обработки и трехмерной печати, в данном случае предпочтительна работа с кривыми, как правило, неоднородными рациональными B-сплайнами (Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS), напрямую без предварительной сегментации. С другой стороны, для уменьшения вычислительной сложности при фрезерной обработке часто применяется аппроксимация криволинейных траекторий линейными участками. В зависимости от требований применяются модули сегментации или работы с NURBS-кривыми.

Кроме того, некоторые модули являются необходимыми для обеспечения работоспособности оборудования. Так, например, модуль управления экструдером позволяет обеспечить требуемую подачу материала при трехмерной печати по технологии FDM. Такие модули называются технологическими.

Предлагается подход к разработке ЧПУ с высоким уровнем детализации, при котором не только основные органы системы (рис. 2, б), но и само ядро (рис. 2, а) состоят из отдельных модулей-блоков, а взаимодействие между ними осуществляется через унифицированный программный интерфейс.

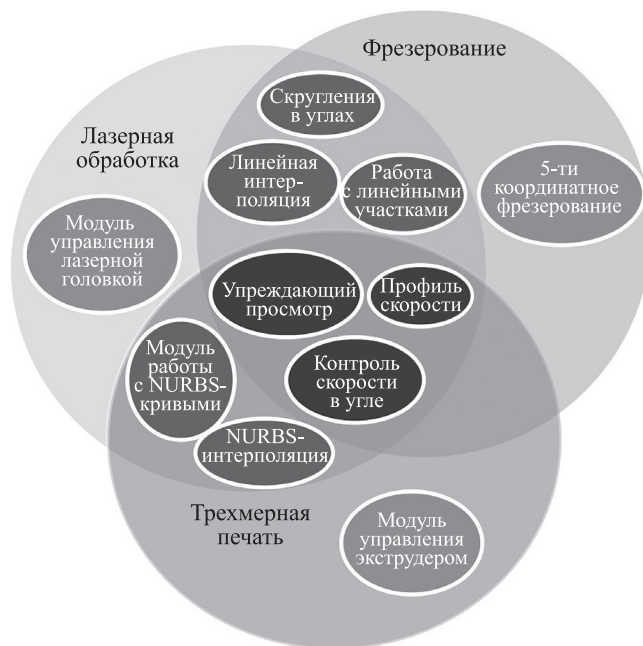


Рис. 1. Наборы модулей для фрезерной, лазерной обработки и трехмерной печати

При этом компонент ядра, отвечающий за оптимизацию и планирование пути рабочего органа, также делится на этапы и разрабатывается из отдельных программных блоков. Команды для управления выходами и состоянием входов интегрированы в циклические данные управления приводом и передаются через один и тот же интерфейс. Этап планирования траектории также делится на модули:

- предварительный анализ геометрии;
- контроль разгона/торможения, где рассчитываются значения скорости инструмента для каждого периода интерполяции;
- интерполяция, где производится формирование управляющих сигналов для двигателей, приводящих рабочий орган в движение.

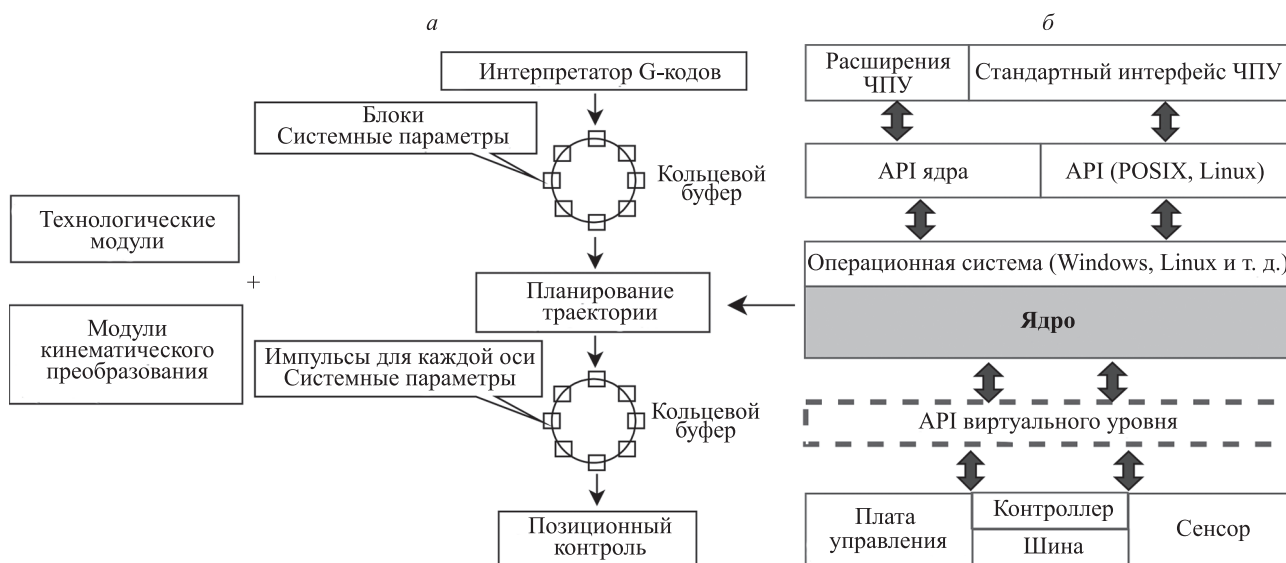


Рис. 2. Структура ядра (а) в составе системы управления (б)

Технологические модули являются необязательными и используются для определенных видов обработки или операций. Например, если технология требует дополнительного движения в процессе формования (управление экструдером) или в случае синхронизации управления движением с такими устройствами, как лазерная головка или электронно-лучевая пушка.

Модуль кинематического преобразования рассчитывает координаты с учетом кинематической схемы станка. Использование конкретного вида преобразования определяется в соответствии с кинематикой станка.

В противоположность предлагаемому решению возможна разработка универсальной системы с ЧПУ, не основанной на модульном подходе, которая уже будет содержать все требуемые функции для любого типа обработки. В таком случае нет необходимости импортировать дополнительные модули. Однако при таком подходе существенно затруднена возможность модификации алгоритмов.

Предлагается повышенный уровень детализации, при котором каждый из перечисленных этапов планирования траектории формируется как отдельный независимый модуль. Основным преимуществом предлагаемого модульного подхода является возможность легко модифицировать имеющиеся алгоритмы путем замены существующих модулей, в наибольшей степени влияющих на точность обработки. Так как точность и скорости обработки зависят не только от аппаратной, но и от программной составляющей установки, то модульное программирование ядра системы ЧПУ позволит повысить эффективность работы оборудования и качество получаемой поверхности.

### Обеспечение модульности в ядре ЧПУ

В практической части работы получена программная библиотека планировщика движения для лазерной обработки, включающая в себя модули: анализа геометрии, контроля скорости и интерполяции. Состав библиотеки представлен на рис. 3. Модуль может работать как с криволинейными траекториями, так и с линейными. Работа планировщика движения построена таким образом, что путем добавления соответствующих модулей (например, NURBS-интерполяции) будет осуществляться работа с кривыми, необходимая, например, в трехмерных принтерах или при лазерной обработке, где часто применяются сложные траектории. С другой стороны, если заменить их на модуль сегментации, то все траектории будут преобразованы в линейные участки, даже если исходные данные в УП представлены в виде кривых.

Таким образом, ПО собрано из блоков, взаимодействующих по открытому программному интерфейсу. Использование кроссплатформенного ядра обеспечивает независимость ПО от конкретной платформы и предоставляет широкие возможности по настройке системы ЧПУ.



Рис. 3. Состав разработанного планировщика траектории

### Возможность модификации открытых систем ЧПУ

Одним из преимуществ блочной разработки ЧПУ является возможность импорта модулей в имеющуюся систему с открытым исходным кодом. В работе рассмотрено применение интерпретатора G-кодов и системы ЧПУ Smoothieware, разработанной для 32-битного контроллера Smoothieboard командой волонтеров. Его преимуществом является возможность расширения имеющегося исходного кода.

Модули данной системы с ЧПУ, входные и выходные данные на каждом этапе показаны на рис. 4. Так как взаимозаменяемость модулей осуществляется за счет открытого программного интерфейса, можно импортировать дополнительные модули или заменять имеющиеся для повышения эффективности обработки.

Данный подход позволит сократить время на разработку ПО, так как основа системы с ЧПУ уже имеется, а также подстроить систему под требуемую аппаратную часть, т. е. при замене физических модулей оборудования.

Рассматривается возможность встраивания в программное обеспечение станка ранее разработанных модулей, в наибольшей степени влияющих на точность обработки, а именно, построения траектории движения инструмента, контроля его скорости и интерполяции. Взаимозаменяемость модулей осуществляется за счет унифицированного API, что позволит заменить их в зависимости от требований и аппаратной части, существенно упростить и повысить эффективность обработки при применении модульного оборудования.

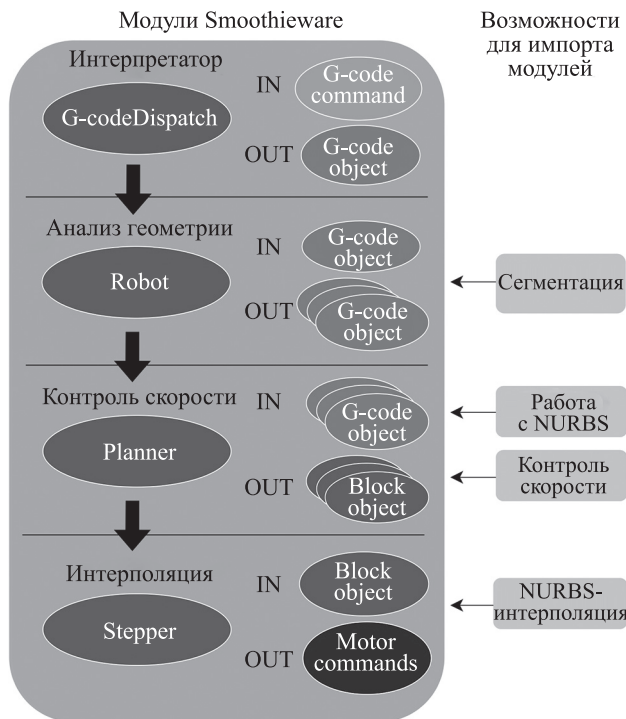


Рис. 4. Возможности модификации системы числового программного управления Smoothieware

### Практическое применение

Описанные в работе модули используются в прототипе модульной платформы технологического оборудования (рис. 5). На данном этапе разработки можно реализовать лазерное и контрольно-измерительное оборудование, возможности трехмерной печати по технологии FDM, а также фрезерной и сверлильной обработки алюминиевых сплавов [15]. Модульная платформа состоит из двухкоординатного стола с возможностью установки дополнительной третьей координаты. Размер рабочего поля  $500 \times 500$  мм, тип привода — серво-шаговый. Рабочий орган перемещается посредством шарико-винтовой передачи (ШВП) и цилиндрических направляющих с линейными подшипниками качения. На оси  $X$  установлена одна ШВП, на оси  $Y$  — две, синхронизированные посредством ременной передачи.

В качестве системы управления установкой применяется контроллер Smoothieboard с системой управления Smoothieware. Модули, отвечающие за формирование траектории, в системе заменены на полученные в ходе работы.

Были проведены симуляции работы программной библиотеки. Рассмотрим пример формирования криволинейной траектории с единичными весами и узловым вектором  $\mathbf{K} = [0, 0, 0, 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1, 1, 1]$  (рис. 6, а). Заданная подача  $F = 50$  мм/с, максимальное уско-

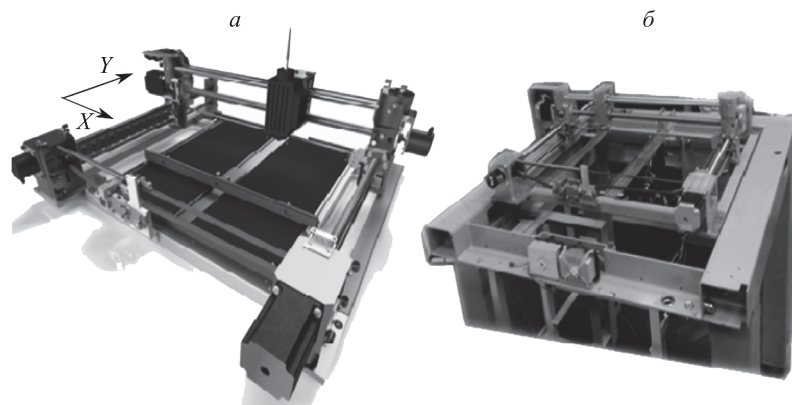


Рис. 5. Платформа в программе Solidworks (а) и в собранном виде (б) [15]

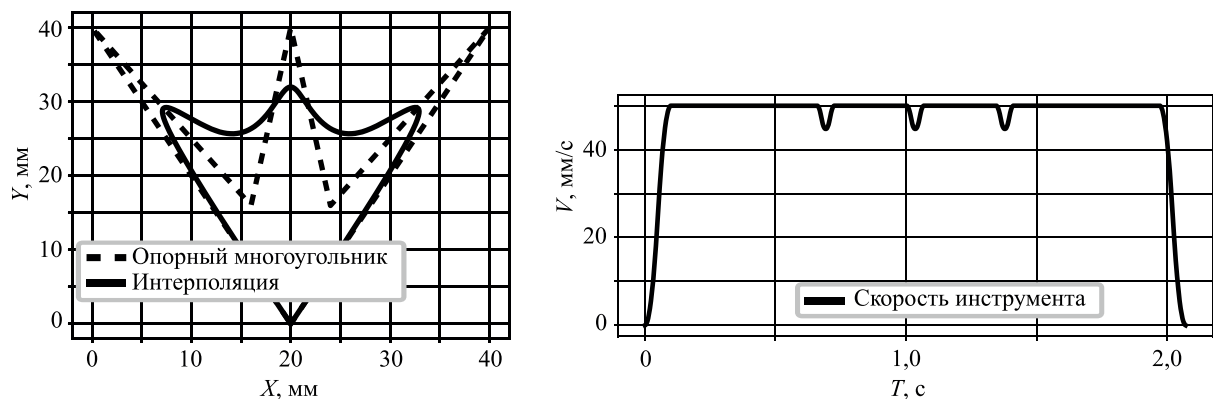


Рис. 6. Пример работы модуля планирования движения: траектория после интерполяции (а); профиль скорости инструмента (б)

рение  $A_{\max} = 2\,000\text{ мм/с}^2$ , рывок  $J_{\max} = 20\,000\text{ мм/с}^3$ . Интерполяция кривой производится напрямую, без предварительной аппроксимации. Полученный профиль скорости, где  $V$  — скорость инструмента, мм/с;  $T$  — время, с, показан на рис. 6, б. Результирующая линейная ошибка обработки оказывается в пределах 17 мкм, а контурная не превышает 7 мкм, что существенно меньше ошибки, возникающей при планировании схожей траектории в системе Smoothiware, где помимо прочего требуется предварительная сегментация исходной кривой.

Полученные модули могут принимать на входе данные из интерпретатора Smoothiware. Сформированные на выходе данные представляют собой экземпляры классов, в которых содержатся скорости и перемещения, требуемые для генерации управляющих сигналов для приводов. В данном виде они могут быть использованы соответствующими модулями системы для управления движением рабочего органа.

## Заключение

В работе предложен подход при разработке ядра системы числового программного управления, который позволяет создавать требуемое программное обеспечение из блоков для применения его на модульном оборудовании. В имеющиеся открытые системы с числовым программным управлением, например, Smoothiware, можно импортировать модули, требующиеся для каждого типа обработки. В ходе работы получен планировщик движения для фрезерной и лазерной обработки, модули которого можно импортировать в систему с числовым программным управлением для повышения эффективности имеющихся алгоритмов.

В дальнейшем планируется разработка и других модулей, позволяющих расширить возможности модульной установки. Следующие направления разработки могут также включать расширение системы числового программного управления до киберфизической системы станка (Cyber-Physical Machine Tool, CPMT), что было предложено в [16] для получения возможности постоянного мониторинга и контроля процесса обработки.

## Литература

1. Lee W., Wei C., Chung S.-C. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. V. 214. N 11. P. 2366–2374. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004
2. Karunakaran K.P., Suryakumar S., Pushpa V., Akula S. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2010. V. 26. N 5. P. 490–499. doi: 10.1016/j.rcim.2010.03.008
3. Hur J., Lee K., Zhu-Hu, Kim J. Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition // *CAD Computer Aided Design*. 2002. V. 34. N 10. P. 741–754. doi: 10.1016/S0010-4485(01)00203-2
4. Jeng J.-Y., Lin M.-C. Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. V. 110. N 1. P. 98–103. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00850-5
5. Amanullah A.N.M., Murshiduzzaman, Saleh T., Khan R. Design and development of a hybrid machine combining rapid prototyping and CNC milling operation // *Procedia Engineering*. 2017. V. 184. P. 163–170. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.081
6. Grigoriev S.N., Martinov G.M. Scalable open cross-platform kernel of PCNC system for multi-axis machine tool // *Procedia CIRP*. 2012. V. 1. P. 238–243. doi: 10.1016/j.procir.2012.04.043
7. Ma X.-B., Han Z.-Y., Wang Y.-Z., Fu H.-Y. Development of a PC-based open architecture software-CNC system // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2007. V. 20. N 3. P. 272–281. doi: 10.1016/S1000-9361(07)60044-2
8. Нежметдинов Р.А. Программно-реализованный логический контроллер – инновационный продукт для автоматизации технологического оборудования // *Инновации*. 2016. № 8(214). С. 99–103.
9. Grigoriev S.N., Martinov G.M. Research and development of a cross-platform CNC kernel for multi-axis machine tool // *Procedia CIRP*. 2014. V. 14. P. 517–522. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.051
10. AlGeddawy T. A new model of modular automation programming in changeable manufacturing systems // *Procedia Manufacturing*. 2017. V. 11. P. 198–206. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.224
11. Wiendahl H.-P., ElMaraghy H.A., Nyhuis P., Zäh M.F., Wiendahl H.-H., Duffie N., Brieke M. Changeable manufacturing – classification, design and operation // *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2007. V. 56. N 2. P. 783–809. doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.003
12. Chiriac N., Hölttä-Otto K., Lysy D., Eun Suk S. Level of modularity and different levels of system granularity // *Journal of Mechanical Design*. 2011. V. 133. N 10. P. 329–339. doi: 10.1115/1.4005069
13. AlGeddawy T., ElMaraghy H. Optimum granularity level of modular product design architecture // *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2013. V. 62. N 1. P. 151–154. doi: 10.1016/j.cirp.2013.03.118

## References

1. Lee W., Wei C., Chung S.-C. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 11, pp. 2366–2374. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004
2. Karunakaran K.P., Suryakumar S., Pushpa V., Akula S. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, vol. 26, no. 5, pp. 490–499. doi: 10.1016/j.rcim.2010.03.008
3. Hur J., Lee K., Zhu-Hu, Kim J. Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition. *CAD Computer Aided Design*, 2002, vol. 34, no. 10, pp. 741–754. doi: 10.1016/S0010-4485(01)00203-2
4. Jeng J.-Y., Lin M.-C. Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 110, no. 1, pp. 98–103. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00850-5
5. Amanullah A.N.M., Murshiduzzaman, Saleh T., Khan R. Design and development of a hybrid machine combining rapid prototyping and CNC milling operation. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 184, pp. 163–170. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.081
6. Grigoriev S.N., Martinov G.M. Scalable open cross-platform kernel of PCNC system for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 238–243. doi: 10.1016/j.procir.2012.04.043
7. Ma X.-B., Han Z.-Y., Wang Y.-Z., Fu H.-Y. Development of a PC-based open architecture software-CNC system. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, vol. 20, no. 3, pp. 272–281. doi: 10.1016/S1000-9361(07)60044-2
8. Nezhmetdinov R.A. Software implemented logic controller — innovative product for technological equipment automatization. *Innovations*, 2016, no. 8(214), pp. 99–103. (in Russian)
9. Grigoriev S.N., Martinov G.M. Research and development of a cross-platform CNC kernel for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 517–522. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.051
10. AlGeddawy T. A new model of modular automation programming in changeable manufacturing systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 11, pp. 198–206. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.224
11. Wiendahl H.-P., ElMaraghy H.A., Nyhuis P., Zäh M.F., Wiendahl H.-H., Duffie N., Brieke M. Changeable manufacturing – classification, design and operation. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2007, vol. 56, no. 2, pp. 783–809. doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.003
12. Chiriac N., Hölttä-Otto K., Lysy D., Eun Suk S. Level of modularity and different levels of system granularity. *Journal of Mechanical Design*, 2011, vol. 133, no. 10, pp. 329–339. doi: 10.1115/1.4005069
13. AlGeddawy T., ElMaraghy H. Optimum granularity level of modular product design architecture. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 151–154. doi: 10.1016/j.cirp.2013.03.118

14. Suh S.-H., Kang S.-K., Chung D.-H., Stroud I. Theory and Design of CNC Systems. Springer Science & Business Media, 2008. 456 p. (Springer Series in Advanced Manufacturing)
15. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В., Крылова А.А., Шорохов С.А. Применение микросервисной архитектуры при проектировании промышленного оборудования с числовым программным управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1(113). С. 87–97. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-87-97
16. Deng C., Guo R., Zheng P., Liu C., Xu X., Zhong R.Y. From open CNC systems to cyber-physical machine tools: A case study // Procedia CIRP. 2018. V. 72. P. 1270–1276. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.110
14. Suh S.-H., Kang S.-K., Chung D.-H., Stroud I. *Theory and Design of CNC Systems*. Springer Science & Business Media, 2008, 456 p. Springer Series in Advanced Manufacturing
15. Afanasiev M.Ya., Fedosov Yu.V., Krylova A.A., Shorokhov S.A. Microservice architecture application in the design of industrial equipment with computer numerical control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1(113), pp. 87–97. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-87-97
16. Deng C., Guo R., Zheng P., Liu C., Xu X., Zhong R.Y. From open CNC systems to cyber-physical machine tools: A case study. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 72, pp. 1270–1276. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.110

#### Авторы

**Зименко Ксения Владимировна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-3792-136X, zksenia@yahoo.com

**Афанасьев Максим Яковлевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57194081345, ORCID ID: 0000-0003-4061-1407, amax@niuitmo.ru

**Колесников Михаил Владимирович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57214971026, ORCID ID: 0000-0003-1559-1766, kmv@itmo.ru

#### Authors

**Kseniia V. Zimenko** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-3792-136X, zksenia@yahoo.com

**Maxim Ya. Afanasev** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57194081345, ORCID ID: 0000-0003-4061-1407, amax@niuitmo.ru

**Mikhail V. Kolesnikov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57214971026, ORCID ID: 0000-0003-1559-1766, kmv@itmo.ru