

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi77.411

Использование методов генерации управляющих программ ЧПУ при изготовлении винта Трооста

Д.С. Макашин¹

ORCID: 0000-0002-8297-5551

А.Г. Кисель²

ORCID: 0000-0002-8014-0550

¹*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

²*Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия*

Аннотация. Компании сталкиваются с растущим спросом на мелкосерийное изготовление судового комплектующего оборудования. Тем самым повышается актуальность производственных систем, позволяющих оптимизировать сроки производства сложных изделий. Автоматическая генерация отдельных блоков программ ЧПУ открывает большие возможности для ускорения и улучшения подготовки производства сложных и особенно мелкосерийных заказов, таких как изготовление винтов Трооста различной конфигурации. Данное исследование посвящено созданию блоков программ ЧПУ на основе параметров, предоставляемых системами конфигурации изделий. Описаны и охарактеризованы различные подходы к процессу подготовки производства. Показано, что прямая передача параметров в программу ЧПУ может быть полностью автоматизирована, но ограничена геометрией изготавливаемой детали, которую можно получать с помощью циклов параметрической обработки. Чтобы определить наиболее подходящую процедуру генерации программы для конкретного случая, была разработана методика решений. Представлена примерная реализация, показывающая возможности автоматизированной генерации программ ЧПУ на производстве деталей винта Трооста. Установлено, что при выборе оптимального способа генерации программы для станка с ЧПУ при изготовлении винта Трооста объем требуемой памяти ПЗУ можно снизить в 10,86 раза. Время обработки при этом сокращается в 1,07 раза, или на 39 минут.

Ключевые слова: ЧПУ, параметры изделий, производственные системы, винт Трооста, конфигуратор, геометрическая информация, генерация

The use of methods for generating control programs of the CNC in the manufacture of the Troost screw

Dmitriy S. Makashin¹

ORCID: 0000-0002-8297-5551

Anton G. Kisel²

ORCID: 0000-0002-8014-0550

¹*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

²*Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia*

Abstract. Companies are facing a growing demand for small-scale production of ship components. This increases the relevance of production systems that optimize the production time of complex products. Automatic generation of individual blocks of CNC programs opens up great opportunities to accelerate and improve the preparation of production of complex and especially small-scale orders, such as the manufacture of Troost screws of

various configurations. This study is devoted to the creation of blocks of CNC programs based on the parameters provided by product configuration systems. Various approaches to the pre-production process are described and characterized. It is shown that the direct transfer of parameters to the CNC program can be fully automated, but is limited by the geometry of the manufactured part, which can be obtained using parametric processing cycles. In order to determine the most appropriate procedure for generating a program for a specific case, a solution methodology was developed. An approximate implementation is presented, showing the possibilities of automated generation of CNC programs in the production of Troost screw parts. It is established that when choosing the optimal method of generating a program for a CNC machine in the manufacture of a Troost screw, the amount of ROM memory required can be reduced by 10.86 times. The processing time is reduced by 1.07 times, or 39 minutes.

Keywords: CNC, product parameters, production systems, Troost screw, configurator, geometric information, generation

Введение

В связи с растущим спросом на изготовление специализированных деталей рынки перестраиваются с рынков продавцов на рынки покупателей [1, 2]. Такая персонализация изделий приводит к уменьшению их серийности [3]. Последние исследования в производственных компаниях подтверждают эту тенденцию об увеличении мелкосерийного производства с большим количеством входящих деталей [4]. Переход от массового производства к специализированному, мелкому производству требует от устоявшихся производственных систем возможности производить специализированные и сложные изделия, начиная от одной штуки, без увлечения по сроку поставки, стоимости или качеству.

Помимо физических производственных процессов, также значительно возрастает сложность обработки заказов. Чтобы справиться со сложностью обработки заказов, в последние годы широко используются системы конфигурации производства. Большинство конфигураторов автоматизации производства поддерживают поток информации от заказа изделия до подготовительных работ и конструкторской документации. В сочетании с ERP-системами автоматически могут создаваться расчеты стоимости изготовления, спецификации материалов, планы сборки, отдельные чертежи, модели САПР и т. д. В результате предприятия, интегрирующие системы конфигурации, упрощают для себя создание производственных процессов. С другой стороны, система ERP не обеспечивает автоматическое создание необходимых индивидуальных программ для управления ЧПУ. Таким образом, не облегчается собственно изготовление отдельных изделий – возрастает сложность и загруженность производственных наладчиков-программистов.

Цели и задачи исследования

В этой статье основное внимание уделяется возможностям автоматизированного создания программ ЧПУ. Основная цель состоит в том, чтобы обеспечить постоянный и быстрый поток информации об отдельных изготавливаемых деталях из системы ERP в программу ЧПУ в системе управления станком (рис. 1). В частности, наряду с автоматизацией CAD/CAM, основанной на расчетной модели отдельной детали, исследование исследует прямую передачу геометрических параметров в программу ЧПУ.

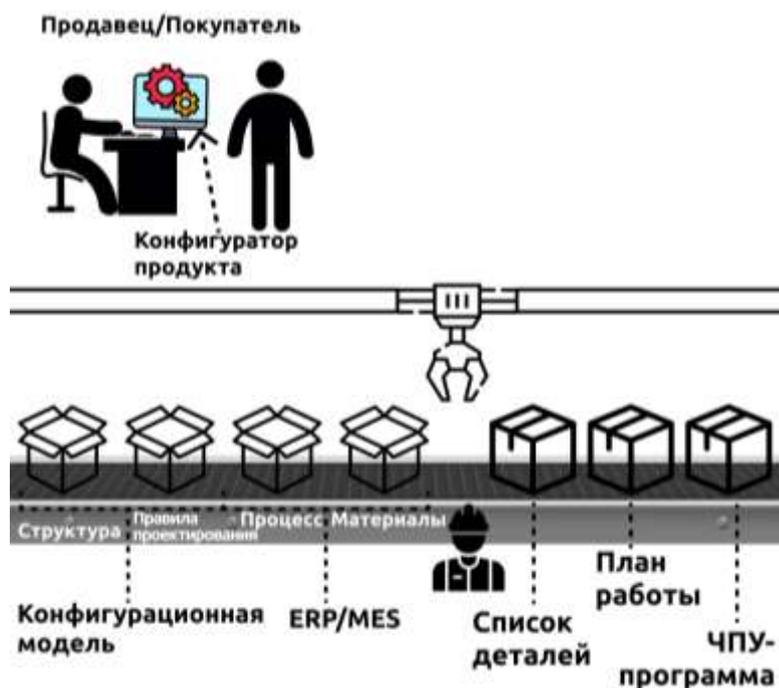


Рис. 1. Автоматизированная генерация программ ЧПУ

Индивидуализация продуктов за счет параметризации

Массовое производство предлагает покупателю ограниченный набор предварительно определенных изделий. Одной из возможностей реализации индивидуальных спецификаций заказа в производстве является применение атрибутов геометрии изделий или его модулей посредством параметризации. Иллюстрация эффекта параметризации отдельных сложных узлов детали (рис. 2, а) позволяет задать сложный блок лопасти отдельным параметром программы. Полностью готовое изделие можно получить с помощью использования нескольких модулей параметров, например, сочетание лопастей получить блоком параметров с использованием кодов G54 – G57 для 1 лопасти (рис. 2, б). Популярны винты серии Трооста, разработанные в Голландии, имеют авиационный профиль вблизи корня с постепенным переходом к сегментному на больших радиусах, где из-за меньшей толщины разница в эффективности мала. Изготовление сложного профиля винта Трооста составляет основные затруднения при его изготовлении.

Подход к индивидуализации производства посредством параметризации открывает важные возможности для удовлетворения потребностей заказчиков:

- Нет необходимости разрабатывать индивидуальные варианты модуля с нуля, как это практикуется в проектировании на заказ производства в ERP системе;
- Отдельные варианты параметризованных модулей могут быть спроектированы с помощью параметрического моделирования в САПР.

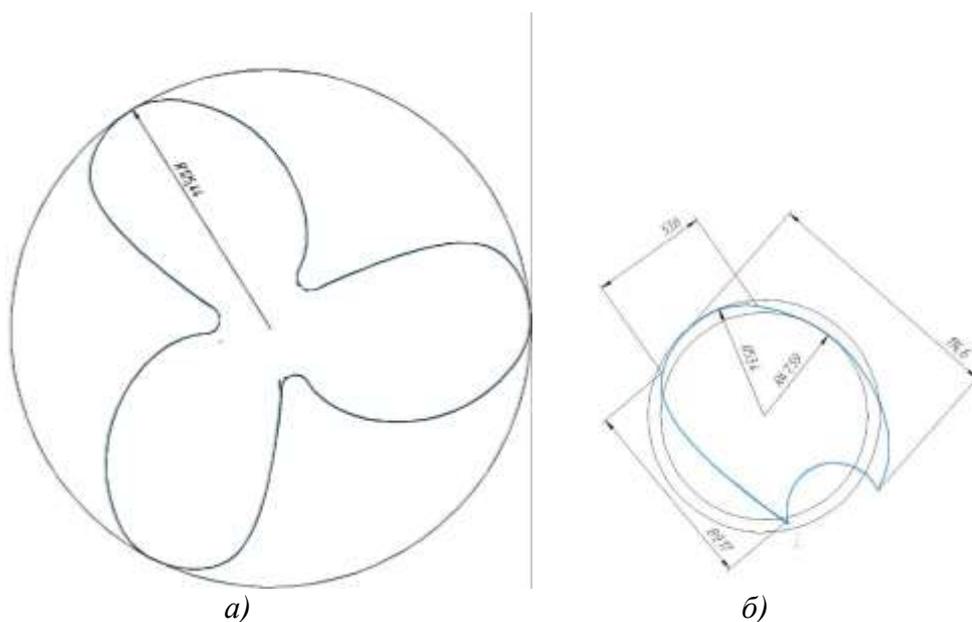


Рис. 2. Индивидуализация продуктов посредством параметризации

Для описания вариантов использования параметризованных модулей была выбрана деталь из отрасли кораблестроения: винт Трооста (рис. 3).



Рис. 3. Модель винта Трооста

Введение в настройку продукта и создание программ ЧПУ

Введение в конфигурацию продукта

Конфигуратор продуктов – это инструменты на основе ИТ решений, которые предоставляют широкий спектр функций для настройки отдельных изделий заказчиков. Заказчик или инженер по продажам получает возможность полностью указать желаемые характеристики путем составления изделий из predetermined модулей (конфигурация и выбор) и выбора характеристик для этих модулей (параметризация) в рамках заданных конфигурационных ограничений. Эти ограничения необходимо заранее скомпилировать в модели конфигурации. Они обеспечивают согласованность сконфигурированного продукта и его характеристик.

Поскольку конфигураторы системы основаны на программном обеспечении, характеристики и функции изготавливаемой детали должны быть адаптированы и дополнены различными способами, полученными из конструкторской документации. Классификация конфигураторов продуктов приведена в [5, 6]. Их можно сгруппировать по трем областям применения:

- Системы конфигурации для идентификации изделий. Они структурируют каталог продукции предприятия, начиная с потребностей заказчика, и позволяет подобрать наиболее подходящие для него детали;
- Системы конфигурации, предназначенные для службы снабжения предприятия. Эта система по продажам упрощает процесс составления каталогов, проводя клиента через процесс его настройки. Полученная деталь может быть визуализирована с помощью предопределенных изображений или моделей CAD. Результатом является полная спецификация детали, а также специальное предложение по цене и срокам поставки для сконфигурированного варианта изделия;
- Системы конфигурации, ориентированные на производство направленные на процесс после того, как изделие было заказано. Для облегчения обработки заказов и подготовительных производственных документов, таких как спецификации материалов, рабочие планы, а также конструкторская документация, они генерируются автоматически [7].

Прикладные методы генерации программ ЧПУ

Автоматическая генерация отдельных программ ЧПУ как функция систем конфигурации изделий в настоящее время применяется в следующих видах:

1. CAD/CAM-программирование.

Одним из результатов процесса конфигурации изделия может быть CAD-модель. Модель CAD можно использовать в программном обеспечении CAM для создания отдельной программы ЧПУ для сконфигурированной детали. Эта сконфигурированная модель CAD, а также модель исходного материала загружаются в программное обеспечение CAM. Технолог генерирует траектории движения инструмента для каждого элемента детали. При использовании программного обеспечения постпроцессора для конкретного станка преобразуются траектории инструмента в программу ЧПУ. Далее программа ЧПУ обычно моделируется для обнаружения и предотвращения столкновений перед процессом обработки. В программном обеспечении CAM, траектории инструмента для геометрических элементов могут быть созданы автоматически, а затем переданы постпроцессором в программу ЧПУ в станок. В этом процессе есть ограничения, связанные с автоматическим распознаванием геометрических элементов, а также индивидуальных ограничений прикладного программного обеспечения.

2. Программирование G-Code и программирование в цехе.

Отдельные чертежи, созданные системой конфигурации, могут использоваться для создания отдельных программ ЧПУ. Это обычно дистанционно выполняет технолог или непосредственно за пультом станка оператор станка. Существующие программы могут быть либо адаптированы к размерам, указанным на чертеже, либо написана новая программа. В обоих случаях могут применяться две процедуры программирования:

- Когда используется G-Code, каждое движение инструмента кодируется с помощью команд, перечисленных в стандарте ISO, а также специальных команд управления станком;

- Программирование с помощью predetermined наборов G-кодов для распространенных функций. Несколько циклов параметрической обработки выбираются и объединяются в программу ЧПУ, в которую вводятся размеры, а также технологические параметры.

Эти методы обеспечивают высокую гибкость, позволяющую реагировать на индивидуальные требования заказчика. Однако такая гибкость приводит к высокой нагрузке на технологов или операторов станков, когда приходится вручную писать или модифицировать каждую программу ЧПУ. Это относится к каждой отдельной детали, даже если только одна функция адаптирована для индивидуализации продукта. Во всех случаях для создания индивидуальной программы ЧПУ необходима ручная работа. Помимо усилий, эти методы генерации программ лежат в основе вариаций из-за человеческих ошибок. Таким образом, они являются частой причиной дефектов и брака.

Подходы к автоматизированной генерации программ ЧПУ

Принимая во внимание цели бережливого производства и идеи цифровых умных заводов, можно сформулировать следующие цели для идеального процесса производства мелкосерийных деталей [8, 9, 10]:

- Передача информации между заказчиком и станком происходит без потерь времени и информации;
- Пространство технологических решений полностью определено, поэтому процесс создания соответствующих вариантов программы ЧПУ точно определен и защищен от ошибок;
- Индивидуальные программы ЧПУ генерируются сразу и доступны в нужное время на нужном станке без увеличения пропускной способности производственного процесса.

На рис. 4 показано идеальное состояние производственного процесса и автоматизированный поток информации о геометрии от заказчика к станку.



Рис. 4. Поток геометрической информации о продукте от клиента к станку

Передача геометрических параметров в циклы параметрической обработки

Этот подход основан на параметрических циклах обработки. Параметрическая программа ЧПУ, содержащая переменные в качестве данных, записывается и сохраняется в системе управления станком. Отдельные геометрические параметры, определенные в процессе конфигурации, автоматически записываются в текстовый файл и сохраняются в сетевой папке в формате, читаемом для системы управления станком. Управление станком подключено к сетевой папке и может открыть или загрузить файл со списком отдельных параметров после выпуска заказа на производство. Затем эти параметры автоматически сопоставляются с переменными в параметрической программе ЧПУ. Таким образом, геометрические параметры и параметрический файл ЧПУ объединяются в отдельную программу. Формат файла, формат параметров и импорт файла параметров различаются для различных доступных элементов управления и версий станка. Из-за множества ограничений задействованных ИТ-систем и средств управления станком этот подход лучше всего работает в проектах с нуля, когда и управление станком и система конфигурации могут быть выбраны в соответствии с требованиями этого подхода. Многие операторы, обученные программированию в цехе, хорошо умеют работать с переменными и параметрическими циклами обработки.

Генератор программ ЧПУ

Если управление станком не поддерживает использование переменных в циклах параметрической обработки или если импорт файлов параметров ограничен, отдельная программа ЧПУ может быть составлена с помощью внешнего программного обеспечения генератора программ ЧПУ. Он сопоставляет отдельные геометрические параметры с предопределенными переменными кодами ЧПУ. Затем

сгенерированный код ЧПУ передается в виде полной программы ЧПУ в систему управления станком.

Если геометрия может быть обработана с помощью базовых G-кодов, то можно использовать универсальные машинно-независимые G-коды. В этом случае сгенерированные программы совместимы для нескольких типов управления станком. Однако обработка многих геометрий вряд ли возможна с помощью базовых G-кодов, и необходимы расширенные циклы обработки, которые обычно зависят от управления станком. В этом случае коды ЧПУ на основе переменных, используемые генератором программ ЧПУ, должны точно соответствовать системе управления станком. Полученные программы ЧПУ можно использовать только на станках с таким же управлением. Вместо создания программ ЧПУ в G-коде можно запрограммировать генератор программ для создания независимых от станка траекторий инструмента в формате CLDATA. Полученные в результате файлы CLDATA, независимые от станка, должны быть обработаны программным обеспечением с постпроцессором для конкретного станка. Программирование машиннонезависимых генераторов CLDATA возможно, но гораздо сложнее по сравнению с G-кодом, генерируемым программным обеспечением.

Внедрение дерева решений для автоматизированной генерации индивидуальных программ ЧПУ

В то время как процесс CAD/CAM основан на модели продукта, генератор программ, а также метод параметрического программирования основаны на предопределенных траекториях движения инструмента и работают без проектной модели. Чтобы облегчить процесс выбора для отдельных вариантов использования, можно использовать методику решений, чтобы определить, подходит ли подход параметрического программирования. На рис. 5 показана методика решений. Она состоит из четырех основных этапов подготовки генерации. На первом этапе определяется, включает ли индивидуализированные элементы геометрии поверхности произвольной формы. Если необходимо изменить поверхности произвольной формы, программа ЧПУ вряд ли может быть реализована путем параметрического программирования циклов обработки или сгенерирована генератором кода ЧПУ. В этом случае процесс CAD/CAM является обязательным.

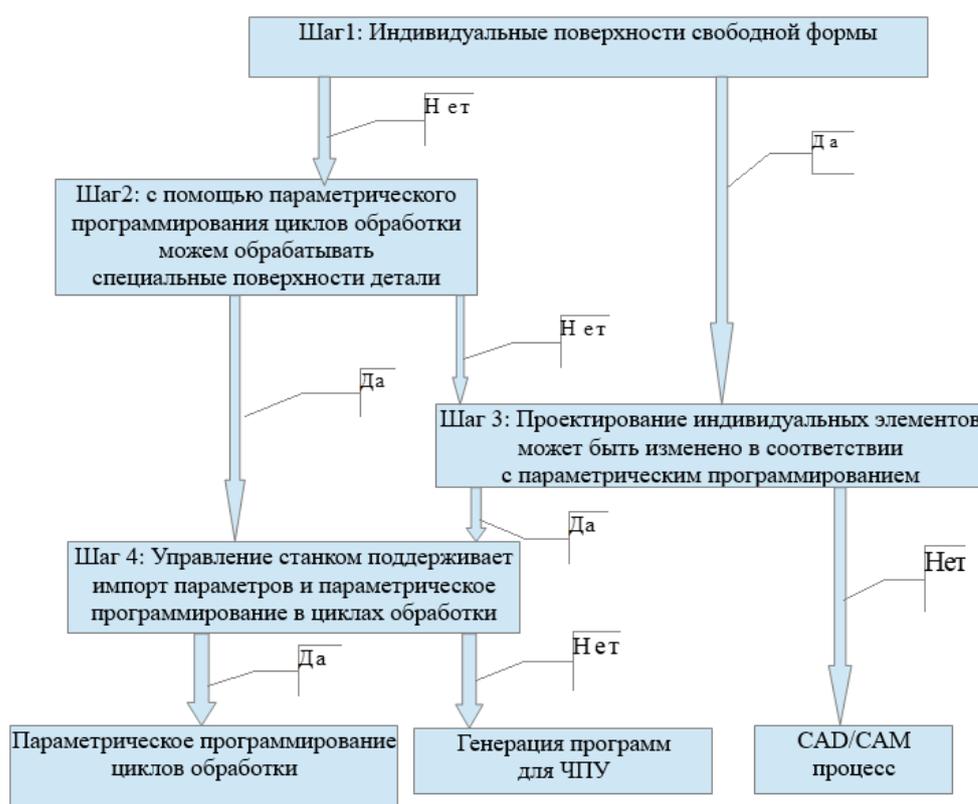


Рис. 5. Методика решений подхода к генерации программ для ЧПУ

На втором этапе определяется, можно ли обрабатывать индивидуальные элементы с помощью параметрического программирования циклов обработки. Следовательно, необходимо учитывать адаптированные функции и диапазон применяемых параметров, а также функциональность станка и используемую систему управления станком. Особое внимание следует уделить фаскам и снятию заусенцев.

Если на первом или втором шаге определяется, что индивидуализация содержит поверхности или элементы произвольной формы, которые не могут быть обработаны с помощью параметрического программирования циклов обработки, следующим шагом является исследование возможности адаптации конструкции изделия. По возможности особенности конструкции должны облегчить параметрическое программирование циклов обработки. Шаг четвертый применяется, если индивидуальные элементы могут быть обработаны с помощью параметрического программирования циклов обработки. Определяется, можно ли импортировать требуемые параметры из сети в систему управления станком и можно ли использовать параметры в рамках запрограммированных циклов обработки. Универсальным подходом является импорт текстовых файлов в формате программы ЧПУ. В этих программах применяемые переменные определяются индивидуальными значениями геометрических параметров. Сама программа обработки сохраняется в системе управления станком и запускается как подпрограмма. Эта подпрограмма обращается к переменным, которые определены в импортированном файле. Если импорт параметров в систему управления станком невозможен или если импортированные параметры нельзя использовать в циклах обработки, нужно применить генератор программ ЧПУ. Принимая во внимание справочные данные

винта Трооста, методика решений показывает, что в случае базового блока решения для создания программ ЧПУ необходимо применять методы CAD/CAM. Это вызвано скруглением между лопастью винта и втулкой, которое нельзя запрограммировать с помощью параметрического программирования циклов обработки. Все остальные элементы можно обработать с помощью параметрического программирования циклов обработки. В некоторой степени это зависит от используемого управления станком, могут ли геометрические параметры быть переданы в параметрическую программу ЧПУ на станке или требуется генератор программ ЧПУ.

Пример реализации генератора программ ЧПУ

Большинство индивидуальных винтов выпускается в количестве одной штуки. Из-за различных размеров компонентов винт Трооста имеет индивидуальный профиль лопасти.

В исходном техпроцессе индивидуальная программа ЧПУ пишется оператором за персональным компьютером. Как указано в таблице 1, процесс обработки занимает 9 часов 5 минут. За счет автоматизированной генерации программ ЧПУ можно добиться:

- Снижения затрат на качество в части доработки и брака;
- Повышения производительности труда.

Все индивидуализированные элементы винта можно обработать с помощью параметрических запрограммированных циклов обработки. Однако управление ЧПУ не поддерживает импортируемые параметры в циклах обработки. Согласно дереву решений, концепция генератора программ ЧПУ была реализована для реализации автоматизированной генерации кодов ЧПУ.

Основой внедрения автоматизированной генерации программ ЧПУ была стандартизация всех факторов, влияющих на генерацию программ и сам процесс обработки. В исходной ситуации хотя бы один рабочий проверял информацию о геометрии при передаче ее из чертежа в систему управления станком.

В процессе настройки в системе создается отдельный XML файл, содержащий информацию об индивидуальной геометрии изделия. Он доступен в системе ERP. Программный помощник автоматически выбирает XML-файлы созданных заказов в ERP-системе и передает их в генератор программ ЧПУ (рис. 6). Генератор программ ЧПУ генерирует индивидуальную программу на основе определенных параметров и передает ее наладчику. Если в процессе генерации возникает ошибка, вместо этого отправляется сообщение об ошибке. Возникающие ошибки устраняются оператором вручную. Программный помощник помещает сгенерированные программы ЧПУ в сетевую папку, которая связана с системой управления станком. Оператор может запускать сгенерированные программы ЧПУ сразу. Основные функциональные возможности генератора программ ЧПУ показаны на рисунке 6.



Рис. 6. Генератор программ ЧПУ для обработки винта Трооста

В дополнение к информации, указанной в файле XML-параметров, генератору программ ЧПУ требуется общая информация о процессе обработки. Это данные инструмента и технологии, а также данные станка. Эта информация указана в таблицах генератора программ и может быть легко изменена. Ядром генератора являются параметрические модули ЧПУ для технологических операций «прошупывание» и «обработка». В процессе обработки для каждой функции был запрограммирован один модуль ЧПУ. Модули ЧПУ подбираются и комбинируются в соответствии с требуемыми характеристиками. Затем задается исходная точка заготовки, а переменные для элементов заменяются значениями, указанными геометрическими параметрами в XML-файле. Параметр,

указывающий материал платформы, применяется для определения, какие инструменты должны быть выбраны, и для установки скорости подачи, а также скорости вращения шпинделя в соответствии с выбранными инструментами. Исходные траектории движения режущего инструмента при обработке винта Трооста представлены на рис. 7. Полученные траектории движения режущего инструмента при обработке винта Трооста представлены на рис. 8.

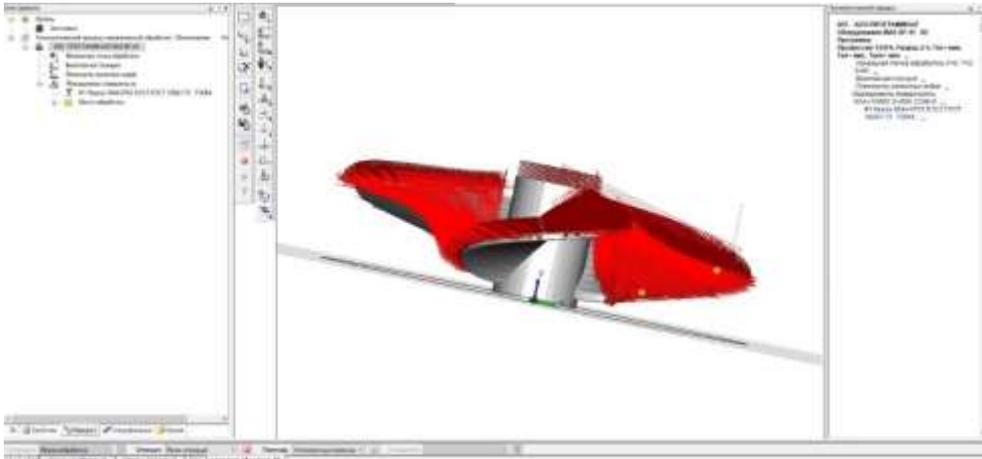


Рис. 7. Исходные траектории движения режущего инструмента при обработке винта Трооста

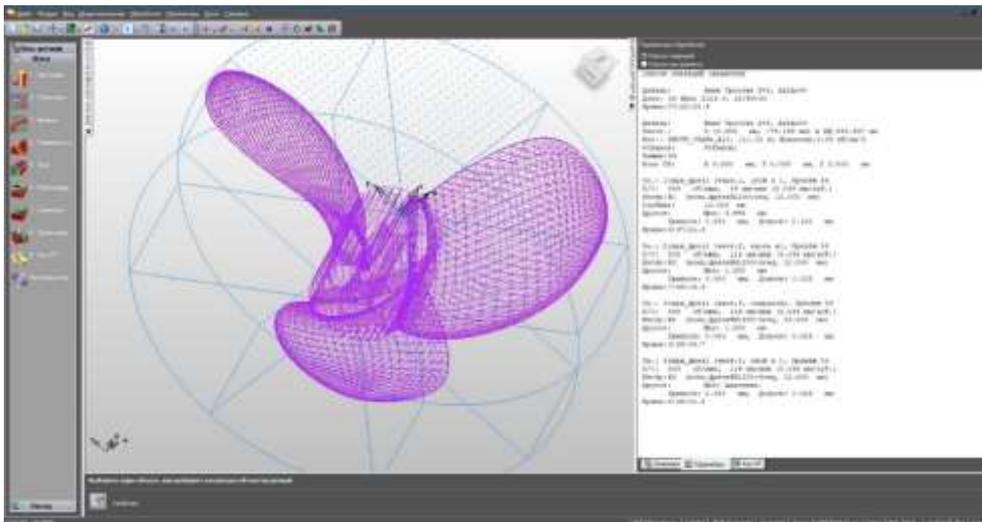


Рис. 8. Полученные траектории движения режущего инструмента при обработке винта Трооста

Расчеты показали возможность автоматизированной генерации программ ЧПУ. При реализации работы удалось сократить время обработки на 7,1%. В то же время объем программы, за счет уменьшения количества кадров в управляющей программе, был уменьшен на 90,78% (таблица 1). Что позволяет существенно оптимизировать хранение управляющий программ обработки для станков с ЧПУ.

Таблица 1

Результаты примерной реализации

№ эксперимента	Время обработки	Объем программы	Кол-во кадров в программе
1	545,06 мин.	16.50 Мб	76425
2	506,31 мин.	1.52 Мб	28401

Заключение

Исследование, представленное в этой статье, связано с растущим спросом на мелкосерийное производство. Установленные системы конфигурации программ ЧПУ объединенные с ERP системой позволяют генерировать несколько типов производственной документации. Эти решения позволяют повысить качество получаемой продукции и уменьшить время получения заказчиком деталей. Помимо автоматизации CAD/CAM, основанной на расчетной модели отдельной детали, описана прямая передача геометрических параметров в программу ЧПУ. В статье проведен анализ подходов, связанных с геометрией детали и управлением станком. Показано, что прямая передача параметров в программу ЧПУ может быть полностью автоматизирована, но ограничена геометрией изготавливаемой детали, которую можно получать с помощью циклов параметрической обработки. Чтобы определить наиболее подходящую процедуру генерации программы для конкретного случая, была разработана методика решений. Представлена примерная реализация, показывающая возможности автоматизированной генерации программ ЧПУ на производстве деталей винта Трооста. Таким образом, при выборе оптимального способа генерации программы для станка с ЧПУ при изготовлении винта Трооста объем требуемой памяти ПЗУ можно снизить в 10,86 раза. Время обработки при этом сокращается в 1,07 раза, или на 39 минут.

Список литературы

1. Мортиков, В.В. Об излишке покупателя и продавца на рынке труда // Народонаселение. – 2021. – Т. 24. – № 2. – С. 109-119. DOI:10.19181/population.2021.24.2.10.
2. Калитин, Б. С. Модель товарного рынка с пассивной реакцией покупателей и продавцов на изменение цен / Б. С. Калитин, Н. В. Новикова // Экономика, моделирование, прогнозирование. – 2021. – № 15. – С. 159-164.
3. Анохов, И. Массовое и бережливое производство / И. Анохов // Общество и экономика. – 2018. – № 7. – С. 51-64. – DOI 10.31857/S020736760000167-2.
4. Осипов, О. Н. Исследование применимости автоматизированных систем управления проектами на судостроительных заводах с единичным и мелкосерийным типами производства / О. Н. Осипов, Т. А. Михеева // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 64. – С. 99-109. – DOI 10.37890/jwt.vi64.101.
5. Ли, В. С. Совершенствование систем автоматизированного проектирования технологических процессов деталей / В. С. Ли, А. С. Мадиярова // Yessenov Science Journal. – 2020. – № 2(38). – С. 53-57.
6. Дуданов, Е. Применение автоматизированных систем распределенного проектирования конструкторско-технологической документации на предприятиях машиностроения / Е. Дуданов // САПР и графика. – 2019. – № 1(267). – С. 48-49.
7. Андриченко, А. Три поколения отечественных САПР технологических процессов / А. Андриченко // Станкоинструмент. – 2017. – № 1(6). – С. 56-63.
8. Фролов, А. В. Основные инструменты реализации бизнес-модели бережливого производства: традиционные и технологические платформы цифровизация производственных процессов / А. В. Фролов, А. Г. Дмитриев // Современные

- технологии: проблемы инновационного развития и внедрения результатов : сборник статей X Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 05 августа 2021 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская Ирина Игоревна), 2021. – С. 104-113.
9. Развитие экологического мышления и навыка бережливого производства в курсе мобильной робототехники / Е. В. Соболева, Н. И. Исупова, Л. В. Караулова, М. М. Ниматулаев // Science for Education Today. – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 149-173. – DOI 10.15293/2658-6762.2001.09.
 10. Волостнов, Б. И. Менеджмент в условиях цифровой трансформации машиностроения / Б. И. Волостнов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 4-20.

References

1. Mortikov, V.V. Ob izlishke pokupatelya i prodavtsa na rynke truda [About surplus of the buyer/seller in the labor market] // Narodonaselenie [Population]. – 2021. – Vol. 24. – Is. 2. – pp. 109-119. (In Russ) DOI:10.19181/population.2021.24.2.10.
2. Kalitin, B. S. Model' tovarnogo rynka s passivnoi reaktsei pokupatelei i prodavtsov na izmenenie tsen [Model of a commodity market with a passive reaction of buyers and sellers to price change] / B. S. Kalitin, N. V. Novikova // Ehkonomika, modelirovanie, prognozirovanie [Economics, modeling, forecasting]. – 2021. – Is. 15. – pp. 159-164. (In Russ).
3. Anokhov, I. Massovoe i berezhlyvooe proizvodstvo [Mass and lean production] / I. Anokhov // Society and Economics. – 2018. – Is. 7. – pp. 51-64. (In Russ) DOI 10.31857/S020736760000167-2.
4. Osipov, O. N. Issledovanie primenimosti avtomatizirovannykh sistem upravleniya proektami na sudostroitel'nykh zavodakh s edinichnym i melkoseriinym tipami proizvodstva [The study of the applicability of automated project management systems at shipyards with single and small-scale types of production] / O. N. Osipov, T. A. Mikheeva // Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. – 2020. – Is. 64. – pp. 99-109. (In Russ) DOI 10.37890/jwt.vi64.101.
5. Li, V. S. Sovershenstvovanie sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov detalei [Improvement of computer-aided design systems of technological processes of parts] / V. S. Li, A. S. Madiyarova // Yessenov Science Journal. – 2020. – № 2(38). – pp. 53-57. (In Russ).
6. Dudanov, E. Primenenie avtomatizirovannykh sistem raspredelennoy proektirovaniya konstruktorsko-tekhnologicheskoy dokumentatsii na predpriyatiyakh mashinostroeniya [Application of automated distributed design systems of design and technological documentation at machine-building enterprises] / E. Dudanov // SAPR i grafika [CAD and graphics]. – 2019. – Is. 1(267). – pp. 48-49. (In Russ).
7. Andrichenko, A. Tri pokoleniya otechestvennykh SAPR tekhnologicheskikh protsessov [Three generations of domestic CAD technological processes] / A. Andrichenko // Stankoinstrument [Machine tool]. – 2017. – Is. 1(6). – pp. 56-63. (In Russ).
8. Frolov, A.V. Osnovnye instrumenty realizatsii biznes-modeli berezhlyvogo proizvodstva: traditsionnye i tekhnologicheskie platformy tsifrovizatsiya proizvodstvennykh protsessov [The main tools for implementing the lean production business model: traditional and technological platforms digitalization of production processes] / A.V. Frolov, A. G. Dmitriev // Sovremennyye tekhnologii: problemy innovatsionnogo razvitiya i vnedreniya rezul'tatov [Modern technologies: problems of innovative development and implementation of results : collection of articles of the X International Scientific and Practical Conference], Petrozavodsk, August 05, 2021. – Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership "New Science" (IP Ivanovskaya Irina Igorevna), 2021. – pp. 104-113. (In Russ).
9. Razvitie ehkologicheskogo myshleniya i navyka berezhlyvogo proizvodstva v kurse mobil'noi robototekhniki [Development of ecological thinking and lean manufacturing skills in the course of mobile robotics] / E. V. Soboлева, N. I. Isupova, L. V. Karaulova, M. M. Nimatuлаev // Science for Education Today. – 2020. – Vol. 10, Is. 1. – pp. 149-173. (In Russ) DOI 10.15293/2658-6762.2001.09.

10. Volostnov, B. I. Menedzhment v usloviyakh tsifrovoi transformatsii mashinostroeniya [Management in the conditions of digital transformation of mechanical engineering] / B. I. Volostnov // Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii [Problems of mechanical engineering and automation]. – 2019. – Is. 1. – pp. 4-20. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Макашин Дмитрий Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Омский государственный технический университет (ФГАОУ ВО «ОмГТУ»), 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: dima.makashin@gmail.com

Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры инжиниринга технологического оборудования, Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236022, г. Калининград, Советский пр., 1, e-mail: kisel1988@mail.ru

Dmitry S. Makashin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Metal-cutting machines and tools", Omsk State Technical University (OmSTU), 644050, Omsk, Mira Ave., 11, e-mail: dima.makashin@gmail.com

Anton G. Kisel, Candidate of Technical Sciences; Docent of the Department of Technological Equipment Engineering, Kaliningrad State Technical University (KSTU), 236022, Kaliningrad, Sovetsky Ave., 1, e-mail: kisel1988@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2023; опубликована онлайн 20.12.2023.
Received 10.10.2023; published online 20.12.2023.