DOI: 10.25728/avtprom.2020.05.02

Числовое программное управление станками с динамически изменяющейся кинематикой

Г.М. Мартинов, Р.Л. Пушков, С.В. Соколов, А.И. Обухов, С.В. Евстафиева (ФГБОУ ВО МГТУ "СТАНКИН")

Рассматриваются возможности изменения кинематики технологического оборудования с помощью машинных параметров. Машинные параметры системы ЧПУ содержат информацию о числе каналов, числе осей, закрепленных за каналами, их кинематических схемах, нуле станка и т.д. Каждой конфигурации системы ЧПУ под конкретный станок соответствует свой набор машинных параметров. Замена одного набора машинных параметров на другой требует перезапуска системы управления (cold start). Предложен подход построения системы ЧПУ, позволяющий с помощью языка высокого уровня для управляющих программ осуществлять переконфигурирование кинематической схемы в соответствии с изменением кинематики станка[1].

Ключевые слова: станки с изменяющейся кинематикой, система ЧПУ, кинематические преобразования, язык высокого уровня для системы ЧПУ.

Введение

Современные станки строятся по принципу модульной архитектуры, что делает возможным изменение или переконфигурирование отдельных модулей [1, 2]. Модули могут подключаться в статическом режиме, например, при переналадке станка на выпуск других деталей, в этот момент обработка на станке не производится, или в динамическом режиме — переключение модулей возможно непосредственно во время выполнения управляющей программы (УП). В работах зарубежных авторов (Zhengyi Xu, Yongquan Wang, A. Muruganandam, A. D'Acunto, P. Martin, I. C. Constantin, S. H. Huang) рассматриваются подходы к изменению кинематики станка за счет варьирования набора модулей. При этом обсуждаются вопросы синтеза возможных структур и компоновок станков из отдельных модулей, например, с помощью генетических алгоритмов, приводятся сравнительные оценки жесткости отдельных компоновок реконфигурируемой производственной системы на основе теории живучести и др. Станки с изменяемой компоновкой должны отвечать определенным требованиям по жесткости и иметь определенные динамические характеристики. Для обычных станков на этапе проектирования закладываются определенные параметры жесткости, а также статические, динамические, точностные характеристики. При разработке станков с изменяемой компоновкой необходимо оценивать характеристики при каждом новом наборе модулей, что требует значительных вычислительных затрат.

Управление технологическим оборудованием с динамически изменяющейся кинематикой требует новых подходов к организации взаимодействия компонентов в архитектуре системы управления, нового алгоритмического и программного обеспечения, в том числе и для управления процессом формообразования. При этом разработка управляющей программы (УП) возможна в CAM-системах [3]. Для динамического переключения кинематической схемы все необходимые типы перемещений должны быть физически реализованы на станке. Например, при обычной фрезерной обработке шпиндель не используется в качестве интерполируемой оси, однако, при изменении кинематической схемы для четырех или пятиосевой обработки шпиндель может принимать участие в интерполируемых перемещениях, расширяя возможности оборудования по обработке деталей. Статья посвящена исследованию возможностей динамического переключения в системе ЧПУ кинематической схемы станка во время выполнения УП («на лету») при помощи специальных команд языка высокого уровня. Сформулированы требования к расширению языка высокого уровня для УП, предложена программная реализация и описаны станочные испытания.

Структура системы ЧПУ и ее конфигурация на конкретный станок

В общем виде структура системы ЧПУ для станков представлена на рис. 1. Система ЧПУ может быть сконфигурирована с одним или несколькими каналами управления. Управляющая программа привязана к каналу управления, она поступает на вход интерпретатора для разбора и анализа всех кадров.

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00305/20.

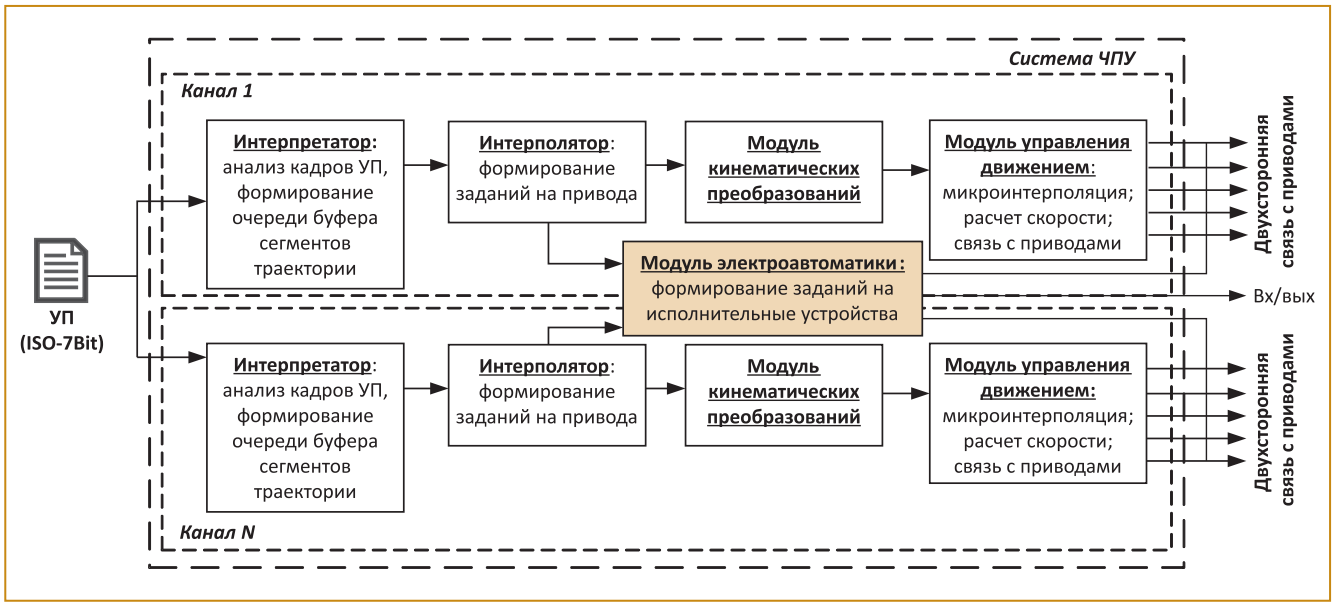


Рис. 1. Структура системы ЧПУ для динамического изменения кинематики

Формируется очередь буферных кадров сегментов траектории, последовательно поступающих на вход интерполятора [4]. На выходе интерполятора получаются координаты перемещения в системе координат детали, которые поступают на вход модуля кинематической трансформации. Модуль кинематических преобразований приводит в соответствие задание перемещений в системе координат детали и станка, преобразуя данные о перемещениях. От модуля кинематических преобразований данные о необходимом перемещении осей в системе координат станка передаются на модуль управления движениями, который формирует задания, поступающие на приводы [5].

Мастер-программа, запущенная на определенном канале управления, может загружать, запускать, синхронизировать и останавливать УП на других каналах управления с помощью функций работы с каналами.

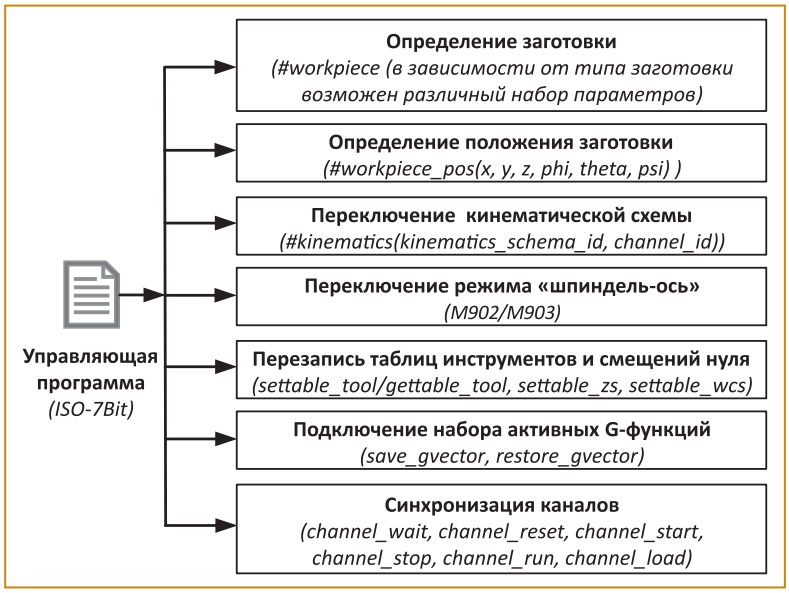


Рис. 2. Структура УП на языке высокого уровня и группы функций, необходимые для смены кинематической схемы

Формирование требований к структуре УП при динамическом изменении кинематики

Появление станков с изменяемой кинематикой приводит к необходимости изменений в архитектуре систем управления, разработке новых алгоритмов управления и директив языка высокого уровня для УП. На рис. 2 предложен набор изменений, которые необходимо сделать в синтаксисе УП, для динамической смены кинематической схемы.

Все изменения обусловлены задачами, которые необходимо решать при динамической смене кинематической схемы. При смене кинематической схемы положение осей изменяется, оси добавляются или выключаются. 3D моделирование процесса обработки требует переопределения параметров заготовки. Необходимо заново определить положение заготовки относительно нуля УП, так как возможно его смещение. При переключении режима шпиндель/круговая ось может иметь обратную связь по положению (для фиксированных поворотов при выполнении определенных операций, интерполяции) или по скорости (вращение инструмента или заготовки в приводе главного движения). Переключение кинематики может потребовать изменения параметров геометрии инструмента. Необходимо иметь возможность получить или записать параметры инструмента в таблицу инструментов напрямую из УП, аналогично это нужно сделать и для записей в таблице смещений нуля. Активный G-вектор, показывающий набор модальных G-функции, активных в настоящий момент времени, необходимо сохранять и восстанавливать при переключении кинематической схемы. Операции с каналами необходимы при использовании мастер канала, в котором

из основной УП конфигурируется кинематическая схема на других каналах перед запуском на них соответствующих УП.

Кинематика станка в конвейере выполнения УП

Выполнение программы ЧПУ производится модулями системы в конвейерном режиме [5]. Кадры последовательно принимаются интерполятором и дробятся на мелкие линейные фрагменты, задаваемые точками в системе координат детали. Затем модуль кинематических преобразований на основе совокупности машинных параметров и заданных режимов работы рассчитывает позиции осей станка для этих фрагментов и готовит команды движения. Команды движения отправляются к модулю управления (рис. 3).

При реализации конвейера обработки кадров введены два абстрактных уровня. Кинематические преобразования реализуются в отдельном модуле, который находится между абстрактными уровнями. Его реализация не зависит от типа траектории движения (отрезок, сплайн, окружность и т. п.) и низкоуровневых алгоритмов управления приводами. Предложенный подход позволяет, с одной стороной, упростить реализацию всех модулей конвейера обработки кадров УП, с другой — менять конфигурацию кинематической схемы «на лету» — в ходе выполнения УП.

Переконфигурирование кинематической схемы станка «на лету» с помощью языка высокого уровня для УП

В ряде случаев при работе на одном станке может потребоваться использование разных кинематических схем. Существуют случаи, когда необходимо в процессе обработки переключиться между пятиосевой и трехосевой схемами, а также деталь может иметь форму, при которой ее полная обработка без переустановки или изменения схемы будет невозможна.

Переключение активной кинематической схемы

В языке высокого уровня для УП реализована директива #kinematics для переключения кинематической схемы в любом месте УП.

#kinematics (kinematics_schema_id, channel_id)

Директива переключает кинематику к схеме kinematics_schema_id в канале channel_id.

Кинематические схемы заранее определены в соответствующих разделах машинных параметров на этапе конфигурирования станка. Замена кинематической схемы производится по факту после опустошения буфера подготовленных кадров, то есть после выполнения всех предыдущих кадров УП.

Переключение режимов шпиндель-ось и их влияние на кинематические преобразования

Шпиндели имеют два режима работы, которые переключаются М-командами.

1. Режим шпинделя (М903) — управление движением по скорости (используется по умолчанию для шпинделей). Используется для осей главного движения токарных станков и фрезерных станков.

2. Режим интерполируемой оси (М902) — управление движением по положению. Используется, например, для режимов токарно-фрезерной обработки при проточке фигурных пазов и винтовых канавок. Во фрезерных станках используется для специальных режимов обработки (например, нарезание резьбы) или измерительных операций.

М902 H1=spindle_id//шпиндель spindle_id переключается в режим оси.

Переключение между режимами может производиться многократно в УП. Если шпиндель переводится в режим интерполируемой оси, модуль кинематических преобразований начинает учитывать ее при расчете движений для реализации заданных угловых координат. И наоборот, когда ось переключается в режим шпинделя, система автоматически начинает выполнять

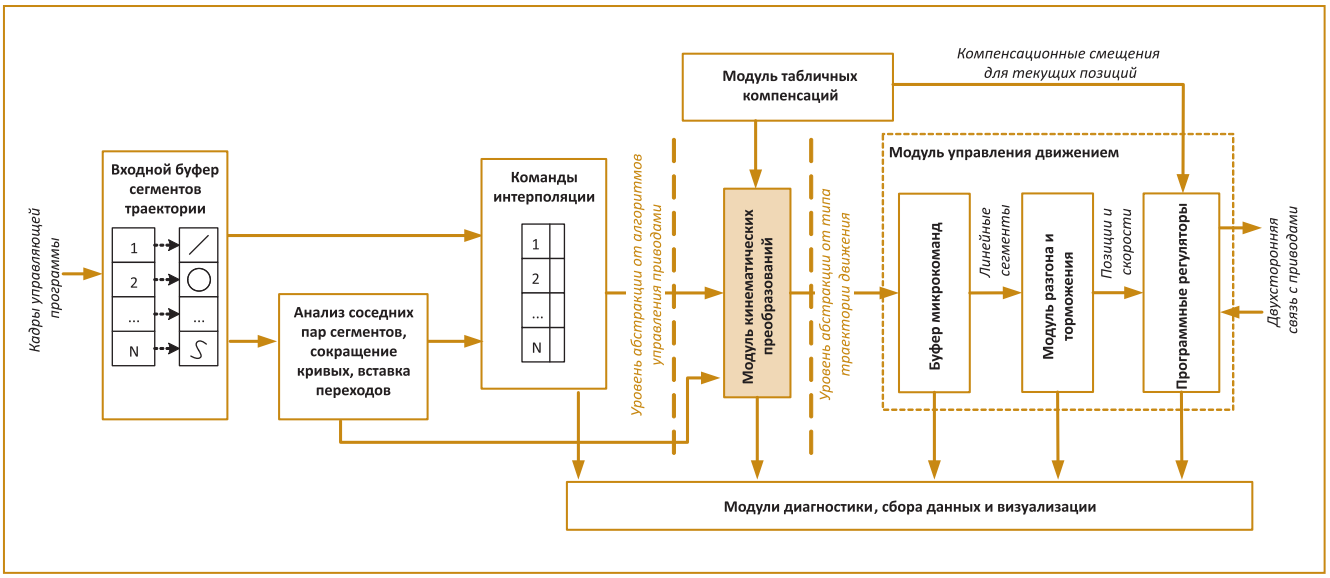


Рис. 3. Модуль кинематических преобразований в конвейере обработки кадров УП

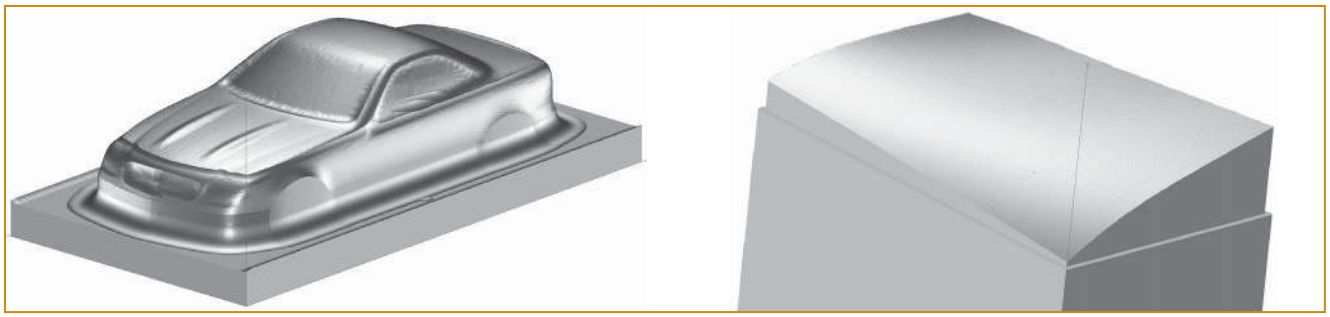


Рис. 4. Модели деталей, обработанные в трех- и пятиосевом фрезерном режиме

трансформации без учета этой оси. Если изменение конфигурации делает невозможным достижение запрограммированной позиции, выполнение программы останавливается с выдачей ошибки оператору.

Дополнительные функции поддержки динамического переключения

К функциям, участвующим в работе с изменением кинематики, относятся:

• функции перезаписи таблиц инструментов и смещений нуля непосредственно из УП (динамическое изменение эффективной геометрии инструмента и смещений систем координат);

settable_zs (table_index, page_number, ax_name, value)//таблица смещения нуля bool settable_tool (tool_index, edge_index, param, value)//таблица инструментов;

• функции сохранения и восстановления набора активных G-функций из каждой модальной группы (G-вектор); *save_gvector (save_attr)//сохранение набора активных G-функций restore_gvector (strgvector)//восстановления набора активных G-функций*;

• функции синхронизации каналов: запуск программы на указанном канале *(channel_load (), channel_start (), channel_run ())*, ожидание завершения программы на другом канале *(channel_wait ()), останов канала (channel_stop (), channel_reset ())*.

Переключение между режимами симуляции обработки

Многие системы ЧПУ реализуют функцию 3D-симуляции обработки в реальном времени (синхронно с выполнением программы на станке). Моделирование процесса обработки твердотельной модели существенно отличается для токарного и фрезерного режимов обработки (по-разному реализуется определение удаляемого объема материала в зависимости от положения инструмента) [6]. Кроме того, динамическое изменение кинематики станка может приводить к изменению нуля текущей системы координат детали. Для учета этих факторов реализованы команды установки и переустановки виртуальной заготовки, которые могут вызываться в любом месте УП после изменения кинематических схем:

• директива #workpiece определяет заготовку для виртуального моделирования обработки и сообщает терминалу ЧПУ о начале обработки (при этом в терминале включается процесс моделирования, если это разрешено оператором).

#workpiece (workpiece_type, screen_resolution, machining_type, X_size, Y_size, Z_size, zero_X, zero_Y, zero_Z)

Параметры определяют заготовку в виде параллелепипеда или цилиндра, включают фрезерный или токарный режим моделирования обработки, задают размеры заготовки по декартовым осям и координаты нуля заготовки.

• Директива *#workpiece_pos* определяет позицию и ориентацию заготовки. В отличие от директивы *#workpiece* вызов *#workpiece_pos* не приводит к созданию новой виртуальной заготовки, а лишь смещает уже установленную. Ориентация заготовки приводится в углах Эйлера (рис. 4).

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования в работе проводились на базе фрезерного обрабатывающего центра Э7106 МФ4 с системой ЧПУ «АксиОМА Контрол» [7, 8]. Станок сконструирован с поворотной обрабатывающей головкой Duplomatic ES-B20 (поворотная ось B) и дополнительно оснащен поворотным столом GSA CNC-200R (поворотная ось C), установленном на основном фрезерном столе станка. Станок имеет возможность выполнять как трехосевые, так и пятиосевые операции на фрезерном и на дополнительном поворотном столе соответственно. Для стендовых испытаний на фрезерном столе одновременно устанавливались тиски для трехосевой обработки и дополнительный поворотный стол для пятиосевой обработки. При проведении экспериментов переналадка станка в процессе обработки детали не требовалась. Необходимые кинематические схемы в системе ЧПУ были предварительно сконфигурированы.

Система ЧПУ сконфигурирована с двумя каналами управления: первый — рабочий канал, за которым закреплены оси и шпиндель, и в нем производится обработка заготовки, второй — мастер канал для управления рабочим каналом [9, 10]. В машинных параметрах системы управления для рабочего канала сконфигурированы две кинематические схемы. Первая схема имеет трехосевую компоновку вертикально-фрезерного станка и содержит линейные оси *XYZ* и шпиндель *S*, смещение нуля системы координат станка привязано к точке установки тисков на фрезерном столе. Вторая схема — пятиосевая с линей-

Таблица. Характеристики управляющих программ для трех- и пятиосевой кинематических схем

	0003_MB_3D.nc	**Impeller_surface.nc**
Тип	3-координатная фрезерная	5-координатная фрезерная
Размер зоны обработки	52 × 86 × 31 мм	52 × 86 × 34 мм
Материал	Алюминиевый сплав Д16Т	Алюминиевый сплав Д16Т
Используемые инструменты	∅6 Концевая фреза ∅6 Концевая сферическая фреза	
Число кадров УП	41 913	173 103
Размер файла УП	1 147 KB	11 955 KB
Время обработки	00:45:34	00:51:11

ными осями *XYZ*, поворотными осями *B* и *C* и шпинделем *S*. Смещение нуля привязано к оси вращения поворотного стола *C*.

Для проведения испытаний подготовлены две УП соответственно под трех- и пятиосевые кинематические схемы станка (таблица).

Схема проведения эксперимента состоит из последовательного выполнения двух УП на рабочем канале с автоматическим переключением «на лету» кинематической схемы станка перед выполнением каждой из УП. Заготовка для детали с трехосевой обработкой закреплена в тисках на фрезерном столе. Заготовка для пятиосевой детали закреплена на поворотном столе. Координация выполнения УП и переключение кинематических схем происходит посредством мастер-программы на языке высокого уровня, запущенной на втором канале системы ЧПУ.

```
//Master channel part program. Should be run on 2nd channel
#include "0003_MB_3D.nc"
#include "Impeller_surface.nc"
#kinematics (1, 1)//load 1st kinematic scheme on channel 1
//execute part program "0003_MB_3D.nc" on channel 1
if (channel_run (1, "0003_MB_3D.nc") == false)
{terminate (1006, "0003_MB_3D.nc");}//error handling
channel_wait (1);//wait for the end of executing part program at channel 1
#kinematics (2, 1)//load 2nd kinematic scheme on channel 1
//execute part program "Impeller_surface.nc" on channel 1
if (channel_run (1, "Impeller_surface.nc") == false)
{terminate (1006, "Impeller_surface.nc");}//error handling
channel_wait (1);//wait for the end of executing part program on channel 1
M30
```

Мастер программа при помощи директивы #kinematics (1, 1) активирует на первом канале трехосевую кинематическую схему. Поворотные оси *B* и *C* станка позиционируются в нулевое положение и фиксируются гидравлическими тормозами для предотвращения их перемещений. Приводы осей деактивируются, а сами оси не учитываются в схеме кинематической трансформации. Управляющая программа "0003_MB_3D.nc" загружается и сразу запускается на первом канале функцией языка высокого уровня channel_run (1, "0003_MB_3D.nc") для обработки модельной машинки (рис. 5а).

Мастер программа на втором канале дожидается окончания выполнения УП "0003_MB_3D.nc" на первом канале с помощью функции channel_wait (1). По завершению работы УП на первом канале мастер программа активирует при помощи директивы #kinematics (2, 1) пятиосевую кинематическую схему на первом канале, поворотные оси разблокируются для участия в обработке детали. Запускается УП "Impeller_surface.nc" на первом канале для обработки поверхности лопатки (рис. 5б).

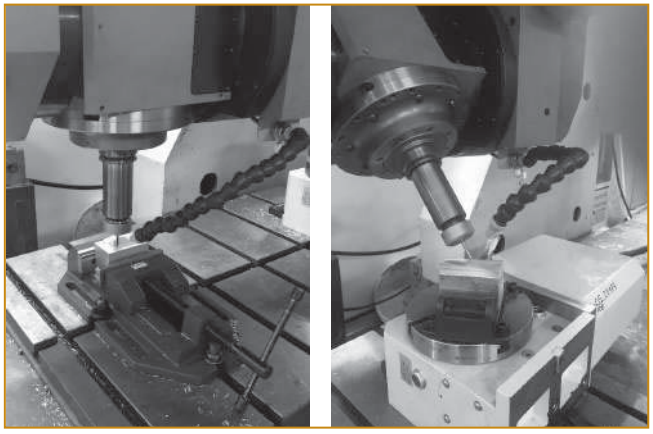
Проведенные испытания показали работоспособность предлагаемого решения и подтвердили возможность переключения кинематических схем станка в автоматическом режиме «на лету».

Заключение

Предложенный подход построения системы ЧПУ предполагает изменения в архитектуре конвейера обработки кадров УП и позволяет с помощью языка высокого уровня для УП переконфигурировать кинематическую схему в соответствии с изменением кинематики станка.

Введение уровней абстракции в конвейере обработки кадров УП обеспечивает независимую реализацию программного модуля кинематических преобразований от типа траектории движения, с одной стороны, и низкоуровневых алгоритмов управления приводами, с другой. В результате задача замены конфигурации кинематической схемы «на лету» (то есть в ходе выполнения УП) решается модулем кинематических преобразований и не затрагивает остальные модули конвейера обработки кадров УП.

Идея расширения семантики языка высокого уровня для переконфигурирования кинематической схемы



а) б)

Рис. 5. Обработка деталей в трехосевом (а) и пятиосевом (б) режимах

Процесс творчества характерен тем, что творец самой своей работой и ее результатами производит огромное влияние на тех, кто находится рядом с ним.
Василий Александрович Сухомлинский

в соответствии с изменением кинематики станка позволяет делегировать часть открытости системы ЧПУ в руки станкостроителей и конечных пользователей. Новые директивы и функции языка высокого уровня для УП решают задачи переключения активной кинематической схемы, переключения режима шпиндельось, перезаписи таблиц инструментов и смещений нуля, сохранения и восстановления набора активных G-функций и переключения между режимами симуляции обработки и т.д. Синтаксис этих директив и функций языка высокого уровня будет зависеть от конкретного производителя систем ЧПУ.

Идея создания и использования мастер канала управления в качестве диспетчера рабочего канала позволила автоматизировать процесс экспериментальных исследований на станке. Мастер канал не имеет физических осей и шпинделя, он является супервизором рабочих каналов управления, обладая полным набором функций по управлению и синхронизации остальных каналов. Такая схема конфигурации каналов управления может быть применена при автоматизации тестирования системы ЧПУ [11].

Список литературы

1. *Martinova, L.I., Martinov, G.M.* Prospects for CNC Machine Tools. Russ. Engin. Res. 39, 1080-1083 (2019). doi:10.3103/S1068798X19120153.
2. *Martinov G, Martinova L, Ljubimov A.* From classic CNC systems to cloud-based technology and back. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2020; 63. doi:10.1016/j.rcim.2019.101927.
3. *Martinova L, Fokin N.* An approach to creation of a unified system of programming CNC machines in the dialog mode. MATEC Web of Conferences. 2018;224:01101. doi: 10.1051/matecconf/201822401101.
4. *Никишечкин П.А., Григорьев А.С.* Практические аспекты разработки модуля диагностики и контроля режущего инструмента в системе ЧПУ // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2013. № 4 (27). С. 65-70.
5. *Petr A. Nikishechkin, Ilya A. Kovalev and Anatolii N. Nikich.* An approach to building a cross-platform system for the collection and processing of diagnostic information about working technological equipment for industrial enterprises. // MATEC Web Conf. Volume 129, 2017 (International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017).
6. *Obukhov A, Evstafieva S, Martinova L.* Real-time cutting simulation based on voxel model. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;709:044062. doi: 10.1088/1757-899X/709/4/044062.
7. *Martinova L, Kozak N, Nezhmetdinov R, Pushkov R, Obukhov A.* The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application. Automation and Remote Control. 2015;76(1):179-186. doi: 10.1134/S000511791501018X.
8. *Petr A. Nikishechkin, Ilya A. Kovalev and Anatolii N. Nikich.* An approach to building a cross-platform system for the collection and processing of diagnostic information about working technological equipment for industrial enterprises. // MATEC Web Conf. Volume 129, 2017 (International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017).
9. *Lilija I. Martinova, Sergey V. Sokolov, Petr A. Nikishechkin.* Tools for Monitoring and Parameter Visualization in Computer Control Systems of Industrial Robots // Advances in Swarm and Computational Intelligence. 6th International Conference, ICSI 2015 held in conjunction with the Second BRICS Congress, CCI 2015, Beijing, June 25-28, 2015, Proceedings, Part II, p.200-207.
10. *Martinova, L., Sokolov, S. and Babin, M.* (2020). Organization of Process Equipment Monitoring. In: 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE. doi:10.1109/CSCMP45713.2019.8976506.
11. *Kovalev I.A., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S.* Approach to Programmable Controller Building by its Main Modules Synthesizing Based on Requirements Specification for Industrial Automation // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16-19 May, 2017.p.1-4.

***Мартинов Георги Мартинов** – д-р техн. наук, проф., **Пушков Роман Львович** – канд. техн. наук, доцент,*
***Соколов Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент,*
***Обухов Александр Игоревич** – канд. техн. наук, доцент,*
***Евстафиева Светлана Владимировна** – ст. преподаватель кафедры компьютерных систем управления, ФГБОУ ВО МГТУ "СТАНКИН".*
Контактный телефон +7 (499) 972-94-40.
E-mail:svetlana.evstafieva@gmail.com

Ctrl2GO создает Центр компетенций по машинному зрению в машиностроении

Группа Ctrl2GO создает Центр компетенций по машинному зрению в машиностроении на базе компании «ЛокоТех-Сигнал» (входит в Ctrl2GO). Цифровое решение на основе искусственного интеллекта позволяет дистанционно управлять локомотивами с минимальным участием человека.

Система обрабатывает данные со множества сенсоров и принимает решение о действиях на локомотиве быстрее времени реакции максимально сконцентрированного и бодрого машиниста, в том числе обеспечивается: достоверный контроль состояния и действий машиниста, энергоэффективное управление движением самого локомотива, обнаружение препятствий для предотвращения столкновений.

Дистанционное управление может осуществляться с помощью переносного или стационарного пульта. Дополнительная разрабатываемая функциональность позволит выдавать определенные задания, которые локомотив будет выполнять самостоятельно в автоматическом режиме.

Система может применяться при маневровой работе, на магистральных линиях, а также на промышленных объектах.

Http://c2g.digital