

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624784>

Оригинальное исследование



# Анализ существующих средств визуализации траектории режущего инструмента в системах ЧПУ

С.С. Гусев<sup>1</sup>, В.В. Макаров<sup>2</sup><sup>1</sup> Ростелеком, Москва, Российская Федерация;<sup>2</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** На сегодняшний день в различных отраслях промышленности для выпуска продукции используются станки для проведения металлообработки и других материалов. Работа данных станков, рассчитанных на ЧПУ, невозможна без использования соответствующих систем, которые позволяют осуществлять оперативное конфигурирование системы для решения различных технологических задач путём управления приводами станка.

**Целью работы** является рассмотрение функциональных возможностей модуля визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» в сравнении с другими известными системами такого же типа с последующим расширением возможностей данного модуля. На основании этого сформулирована цель работы, а именно: расширение функциональных возможностей модуля визуализации траектории перемещения режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол» путём разработки модуля анализа его траектории.

**Материалы и методы.** Для достижения цели поставлена следующая задача, направленная на расширение функциональных возможностей модуля отрисовки режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол», а именно: анализ существующих средств визуализации траектории режущего инструмента в системах ЧПУ.

**Результаты.** Результатом исследовательской работы является то, что интерфейс отрисовки крайне важен для работы, поскольку позволяет оператору быстро оценить внештатную ситуацию. Ошибки могут возникать на всех стадиях наладки обработки детали. Они могут быть допущены как при позиционировании детали или инструмента, так и при привязке нулевой точки, настройке смещений осей и многого другого. Конечно, при наладке станочного оборудования, как правило, возникают трудности, если ранее были сделаны другие настройки под другой заказ. Для этого в системах управления (ЧПУ) необходимы такие функциональные возможности, как визуализация обработки. Данная функциональность крайне важна, она позволяет вовремя заметить ошибку, оценить её опасность и вовремя исправить, что сохранит как оборудование, так и инструмент от поломки и чрезмерного механического воздействия.

**Заключение.** Выполнена работа, в которой содержится решение задач по анализу траектории перемещения режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол». Проведённый в статье анализ выявил, что большинство систем ЧПУ не реализовало представленные функциональные возможности, что не позволяет производить полноценный анализ процесса обработки.

**Ключевые слова:** производство; промышленность; металлообработка; технологические задачи; визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол».

## Как цитировать:

Гусев С.С., Макаров В.В. Анализ существующих средств визуализации траектории режущего инструмента в системах ЧПУ // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 2. С. 157–167. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624784>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624784>

Original Study Article

# Analysis of existing means of the cutting tool path visualization in the CNC systems

Sergey S. Gusev<sup>1</sup>, Vadim V. Makarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rostelecom, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Currently, machines for processing metals and other materials are used in various industry sectors. Operation of these machines defined with the CNC is impossible without using the corresponding systems, which ensure performing real-time configuring of the system for solving various technological tasks by means of machine drives control.

**AIM:** Analysis of functional capabilities of the visualization module of the AksiOMA Kontrol CNC system in comparison with other well-known same-type systems with consequent enlarging of capabilities of this module. Based on this, the study aim is formulated as follows: broadening the functional capabilities of the module of cutting tool motion path visualization in the AksiOMA Kontrol CNC system by means of development of the path analysis module.

**METHODS:** For achieving the aim, the next task to broaden the functional capabilities of the module of cutting tool path visualization in the AksiOMA Kontrol CNC system is formulated as follows: analysis of existing means of cutting tool path visualization in the CNC systems.

**RESULTS:** The study result is the fact that the visualization interface is critically important for operation, as it helps the operator to assess the abnormal situation quickly. Mistakes can be found at every stage of part machining setting-up. The mistakes can be made when positioning the part or the tool, at zero-point binding, at axes offset setting-up, etc. When machine equipment is set up, generally, difficulties take place if there is a different set-up for the other order. For these cases, in the CNC systems, such functional capabilities as processing visualization are necessary. This functionality is critically important, as it helps to find a mistake in time, to assess the danger level, and to fix it in time, that helps to prevent both the machine and the tool from failure and excessive mechanical impact.

**CONCLUSION:** The study, which contains solving the tasks of analysis of cutting tool motion path in the AksiOMA Kontrol CNC system, is completed. The analysis conducted in the paper revealed that majority of CNC systems does not have the presented functional capabilities that does not help to conduct the complete analysis of the machining process.

**Keywords:** manufacturing; industry; metalworking; technological tasks; visualization of the AksiOMA Kontrol CNC system.

## To cite this article:

Gusev SS, Makarov VV. Analysis of existing means of the cutting tool path visualization in the CNC systems. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(2):157–167.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624784>

Received: 18.12.2023

Accepted: 27.06.2024

Published online: 25.07.2024

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в различных отраслях промышленности для выпуска продукции используются станки для проведения металлообработки и других материалов. Работа данных станков, рассчитанных на ЧПУ, невозможна без использования соответствующих систем, которые позволяют осуществлять оперативное конфигурирование системы для решения различных технологических задач путём управления приводами станка. В текущей работе представлено рассмотрение функциональных возможностей модуля визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» в сравнении с другими известными системами такого же типа с последующим расширением возможностей данного модуля.

Для достижения цели поставлена следующая задача, направленная на расширение функциональных возможностей модуля отрисовки режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол», а именно: анализ существующих средств визуализации траектории режущего инструмента в системах ЧПУ.

Научная новизна работы заключается в разработке методики проведения анализа траектории режущего инструмента, отличающейся реализацией алгоритмов и представлением данных.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является рассмотрение функциональных возможностей модуля визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» в сравнении с другими известными системами такого же типа с последующим расширением возможностей данного модуля. На основании этого сформулирована цель работы — расширение функциональных возможностей модуля визуализации траектории перемещения режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол» путём разработки модуля анализа его траектории.

### Анализ существующих средств визуализации траектории режущего инструмента

Интерфейс отрисовки крайне важен для работы, поскольку позволяет оператору быстро оценить внештатную ситуацию. Ошибки могут быть на всех стадиях наладки обработки детали. Ошибка может быть допущена как при позиционировании детали или инструмента, так и при привязке нулевой точки, настройке смещений осей и многого другого. Конечно, при наладке станочного оборудования, как правило, возникают трудности, если ранее были сделаны другие настройки под другой заказ. Для этого в системах управления (ЧПУ) необходимы такие функциональные возможности, как визуализация обработки. Данная функциональность крайне важна, она позволяет вовремя заметить ошибку, оценить её опасность и вовремя исправить, что защитит как оборудование, так и инструмент от поломки и чрезмерного механического воздействия.

Помимо этого, наличие визуализации может позволить оператору-программисту оценить правильность выбранных алгоритмов обработки, технологических решений по обработке заготовки, скорость обработки, которая крайне важна для поточного производства [1].

Многие решения, применённые в современности, построены на новых технологиях в сфере IT, поскольку активно используется 3D-визуализация с динамическими объектами, динамической отрисовкой процесса резания и обработки в целом.

Существует несколько видов визуализации: визуализация траекторий, подразумевается, что это 2D-визуализация движения инструмента на рабочей плоскости, и 3D-визуализация всей обработки, которая включает в себя визуализацию снятия материала с заготовки, симуляцию движения и вращения инструмента, визуализацию скорости резания, параметров инструмента и времени обработки.

Как было сказано ранее, большую популярность имеют системы с 3D функциональной возможностью, поскольку для большинства людей полноценная визуализация имеет большую информативность. С другой стороны, аппаратная часть должна обладать достаточной вычислительной способностью, что естественно привносит новые требования [2].

Рассмотрим реализацию визуализации в разных системах ЧПУ от разных фирм и произведём некоторый анализ.

#### SIEMENS SINUMERIK 840D

Одна из самых известных систем ЧПУ — система от компании *Siemens*. Данная система является до сих пор флагманом индустрии благодаря огромному опыту компании в данной сфере, огромному количеству наработок, решений, качественному программному продукту и достаточной сервисной поддержке.

Интерфейс продукта от данной компании крайне упрощён, в первую очередь, внедрением готовых форм, заполняя которые, система сама прописывает управляющий рабочий код, многое в данной системе упрощено и максимально наглядно. Имеется возможность писать чистый G-код при необходимости, но для большинства удобны программные упрощения, такие как *ShopMill* или *ShopTurn*.

Также компания не обошла стороной визуализацию. В данном продукте имеется визуализация траекторий, которая включена в общий комплекс визуализации, также присутствует и мощная 3D-визуализация. В целом компания приложила много усилий для создания наглядности, упрощённости для оператора. Достаточно неплохо продумала интерфейс, с которым необходимо соприкоснуться пользователю.

На рис. 1 приведён пример визуализации обработки заготовки, представленный в среде разработки *Sinumerik 840D*. Как мы видим, визуальная составляющая представляет собой несколько частей:

- 1) визуализация заготовки;
- 2) визуализация инструмента;
- 3) отрисовка нулевой точки детали.

Из функциональных возможностей в данном окне есть возможности переключения между видами, возможность оценить траекторию инструмента сверху детали, а также каждую боковую сторону, если это требуется. Также имеется возможность дополнительной настройки заготовки под обработку с использованием стандартных координат XYZ [3].

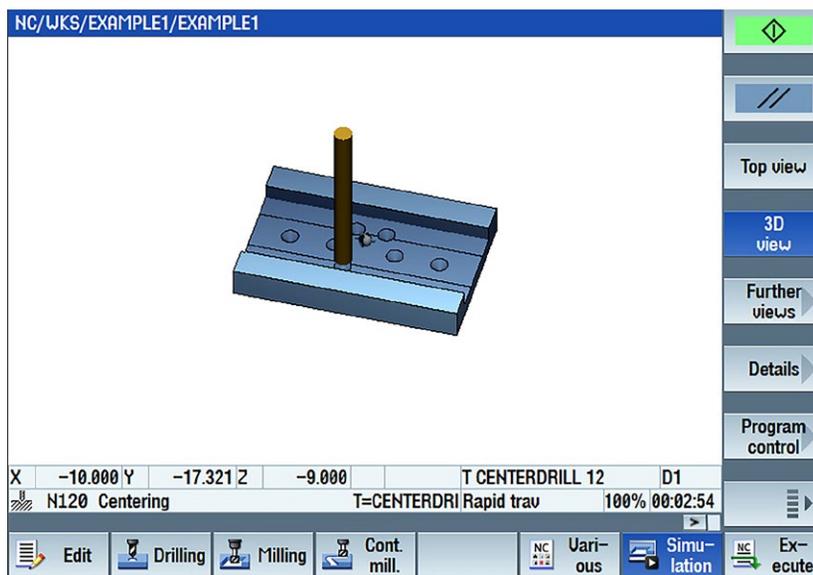
На рис. 2 рассмотрим 2D-визуализацию.

В отличие от некоторых других систем ЧПУ 2D-режим включается в общем модуле визуализации отдельной кнопкой без необходимости выходить в главное меню. Это упрощает работу с системой и позволяет ей быть наглядной для пользователя. В этом режиме также

отрисовывается заготовка, нулевая точка и инструмент и так же, как и в режиме 3D, обработанная поверхность окрашивается в другой цвет.

Имеется возможность приближать/отдалять заготовку, а также одной кнопкой выбрать направление взгляда обрабатываемой модели. Ещё имеется возможность регулировать скорость обработки (визуализации) детали, но в ограниченных пределах. Помимо этого, имеется возможность отключать/включать отрисовку траектории инструмента.

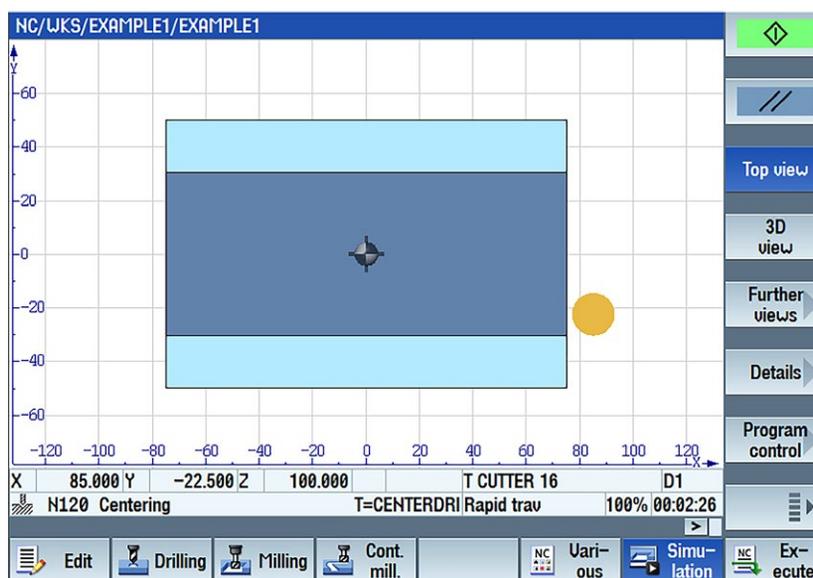
В процессе обработки все показания отображены исключительно на экране с параметрами. При визуализации



Edit → Редактировать  
 Drilling → Сверление  
 Milling → Фрезерование  
 Cont. mill. → Продолжение следует  
 Various → Разнообразный  
 Simulation → Моделирование  
 Execute → Выполнять  
 Program control → Программное управление  
 Details → Подробности  
 Further views → Дополнительные виды  
 3D view → Трёхмерный вид  
 Top view → Вид сверху

Рис. 1. Пример 3D-визуализации в Sinumerik 840D.

Fig. 1. An example of the 3D visualization in the Sinumerik 840D.



Edit → Редактировать  
 Drilling → Сверление  
 Milling → Фрезерование  
 Cont. mill. → Продолжение следует  
 Various → Разнообразный  
 Simulation → Моделирование  
 Execute → Выполнять  
 Program control → Программное управление  
 Details → Подробности  
 Further views → Дополнительные виды  
 3D view → Трёхмерный вид  
 Top view → Вид сверху

Рис. 2. Режим 2D-визуализации.

Fig. 2. The 2D visualization mode.

обработки отображается только программные координаты и динамические параметры.

В данном окне нет возможности отслеживать и анализировать параметры обработки. Функциональные возможности по отображению заготовки от режима симуляции отличаются незначительно.

Также имеется возможность масштабировать заготовку, переключаться между видами обработки. На этом функциональные возможности визуализации при обработке закончились.

### ITNC640 HEIDENHEIN

Система *Heidenhein* также представляет продукт, который имеет достаточные возможности для визуализации. На рис. 4 представлен режим визуализации в режиме отладки [4].

Функциональная возможность режима отладки в системе *Heidenhein* имеет кадровое воспроизведение симуляции процесса обработки, тем самым позволяет вовремя оператору оценить ситуацию, если процесс по какой-то причине может привести к какой-либо аварийной ситуации.

В предыдущей системе такого нет, что естественно выгодно отличает эту систему.

Также имеется возможность установки «флажка» остановки. Программа при выполнении остановится на той строчке, у которой есть точка-останова. Данная возможность также позволяет программисту-оператору быстро отследить и обнаружить ошибки в конкретной части кода без прогона всего кода.

Компания *Heidenhein* воспользовалась уже существующими в мире высокоуровневого программирования методами отладки кода. Этот подход положительно

зарекомендовал себя и позволяет быстро искать ошибки в коде.

В режиме теста (отладки) пользователю предлагается несколько режимов отображения информации на экране пользователя: программа+графика, программа+состояние. В первом на экран выводится код программы и визуальная составляющая, во втором — код программы и показания по координатам, значения параметров и другое. Данное разделение имеет смысл тогда, когда в параметрах обработки достаточно много информации и необходимо разделить её на отдельную вкладку.

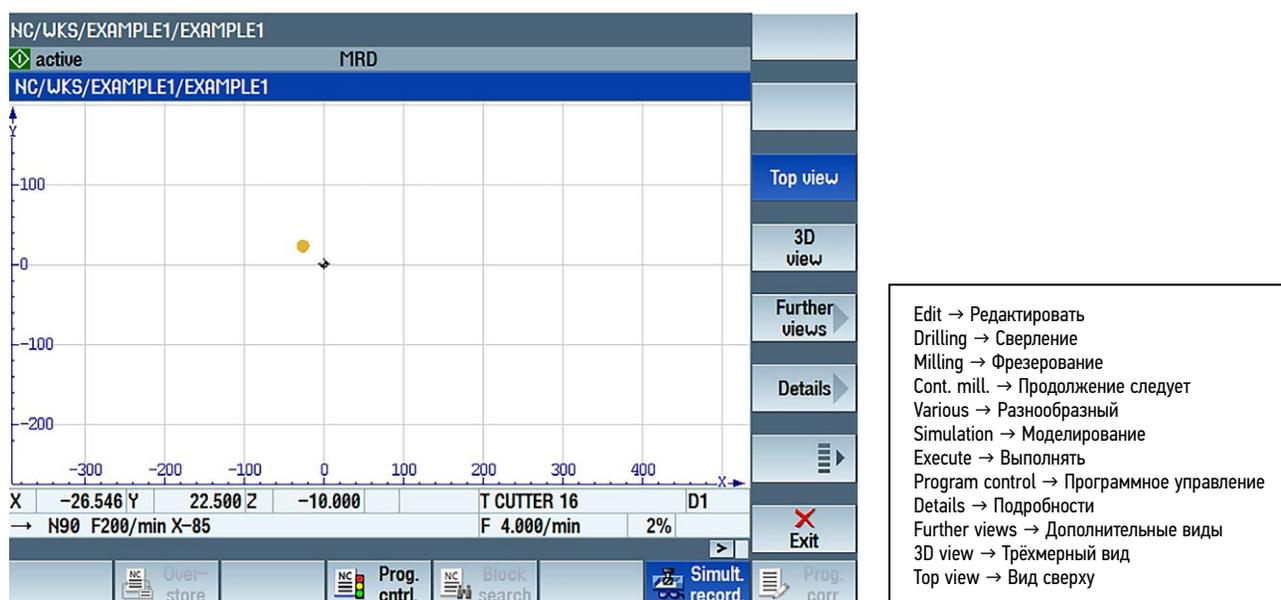
Данное решение может пригодиться в ситуации, когда необходимо расширить спектр информации, необходимой программисту-оператору. Например, реальные показания с датчиков положения, ускорения, которые возникают при обводе контура заготовки и многое другое [5].

### FAGOR

Компания *FAGOR* имеет огромные возможности в плане визуализации. На рис. 5 показана 3D-визуализация системы ЧПУ *FAGOR*. 3D-визуализация в системе ЧПУ достаточно хорошо реализована. Отрисовка производится по двум объектам: сама модель заготовки и инструмент, что крайне необходимо для процесса визуализации. По функциональным возможностям система предлагает все стандартные функции, это приближение/отдаление, переключение видов, изменение цветов обработки.

В данной системе 3D и 2D переключается в соответствующем меню, где есть 7 вариантов отображения:

- 1) отображение 3D-линий;
- 2) секционное отображение (чертёжные 3 вида);
- 3) плоскость XY;
- 4) плоскость XZ;



**Рис. 3.** Визуализация в процессе обработки в системе ЧПУ *Sinumerik*.  
**Fig. 3.** Visualization in the machining process in the *Sinumerik* CNC system.



Рис. 4. Система ЧПУ Heidenhein.  
 Fig. 4. The Heidenhein CNC system.

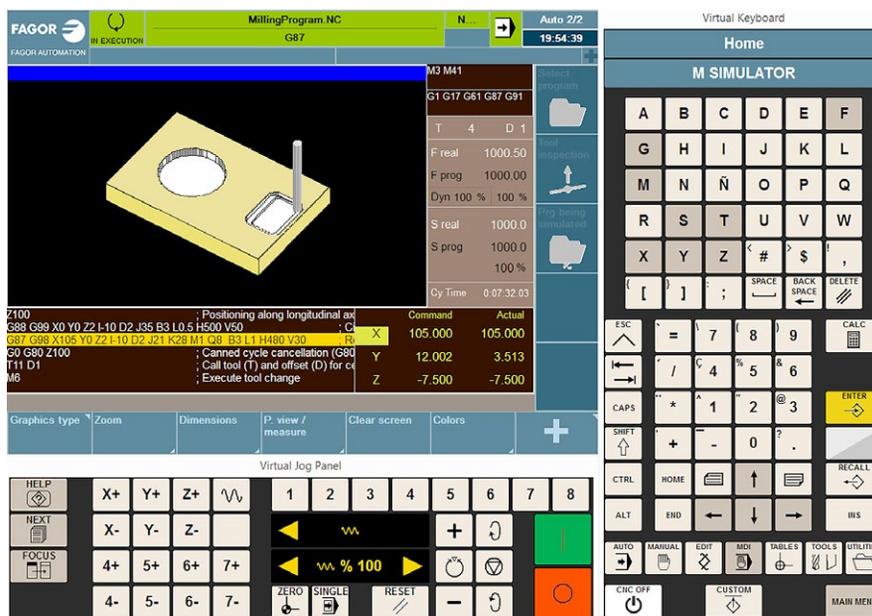


Рис. 5. 3D-визуализация в системе ЧПУ FAGOR.  
 Fig. 5. The 3D visualization in the FAGOR CNC system.

- 5) плоскость YZ;
- 6) комбинационное отображение (3 — 2D-вид, 1 — 3D-вид);
- 7) 3D-отображение.

Также стоит отметить область отображения параметров обработки. Любое показание поделено на 2 вида: реальные параметры, при которых идёт обработка, и программные параметры. Справа представлены столбцы реальных и программных данных по координатным осям, а чуть выше представлены динамические характеристики процесса: подача и скорость вращения заготовки. То же самое есть и в 2D-режиме (рис. 6) [6].

В данной системе ЧПУ отладка управляющей программы с помощью средства визуализации затруднена, поскольку нет возможности быстро редактировать код программы, не выходя из режима симуляции. Возможности ускорять визуализацию, помимо увеличения скорости обработки, также нет, как нет и возможности прерывать симуляцию на конкретных строчках кода управляющей программы. Симуляция происходит для всего кода, для редактирования нужно остановить симуляцию, сбросить программу, отредактировать код программы и заново запустить симуляцию.

Важно отметить, что есть возможность в данной системе ЧПУ видеть реальные параметры процесса обработки, т. е. реальные положения координат, реальные скорости обработки и вращения инструмента, но отсутствует возможность анализировать данные реальные параметры наглядно [7].

В режиме визуализации режима обработки система отображения схожа с отладочной визуализацией.

Помимо этого, есть возможность распечатать и сохранить в файл изображение обработки детали в формате

\*.bmp. Это позволяет выводить результат обработки для последующего анализа и формирования последующих действий и работ [8].

Данная функциональная возможность отсутствует у всех выше представленных систем, что выгодно выделяет эту систему среди остальных.

#### СИСТЕМА ЧПУ «АКСИОМА КОНТРОЛ»

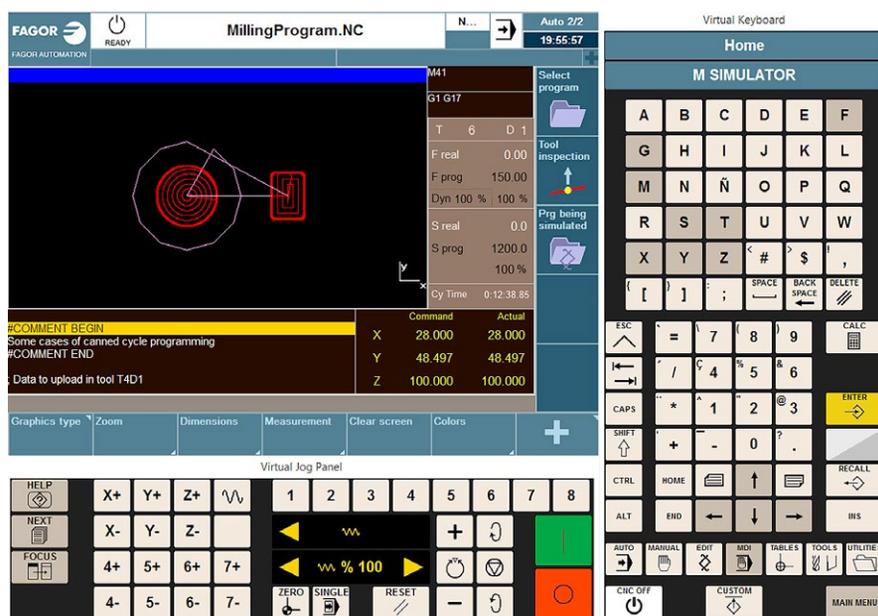
Система ЧПУ «АксиОМА Контрол» также обладает возможностью визуализации (рис. 7, 8). В данной системе ЧПУ есть возможность как для 2D-визуализации, так и для 3D-визуализации.

Данная система имеет достаточно большие функциональные возможности как в симуляции процесса обработки, так и в процессе визуализации обработки в реальном времени.

В данной системе ЧПУ «АксиОМА Контрол» имеются практически все те же функции, которые есть и в других выше рассмотренных системах ЧПУ. В вертикальной панели представлены клавиши перемещения заготовки в пределах окна визуализации, имеется возможность приближения/удаления заготовки. Если остановить процесс визуализации, возможно использовать дополнительные настройки, например, изменение цветов, масштабов заготовки.

В окне визуализации отображается траектория инструмента, код программы, геометрические и технологические параметры обработки детали [9].

В данном режиме существует большая функциональность. Можно менять единицы измерения, систему координат, единицы подачи, выводить на экран графики сразу с двух каналов. Данная функциональность



**Рис. 6.** 2D-визуализация в системе ЧПУ FAGOR.  
**Fig. 6.** The 2D visualization in the FAGOR CNC system.

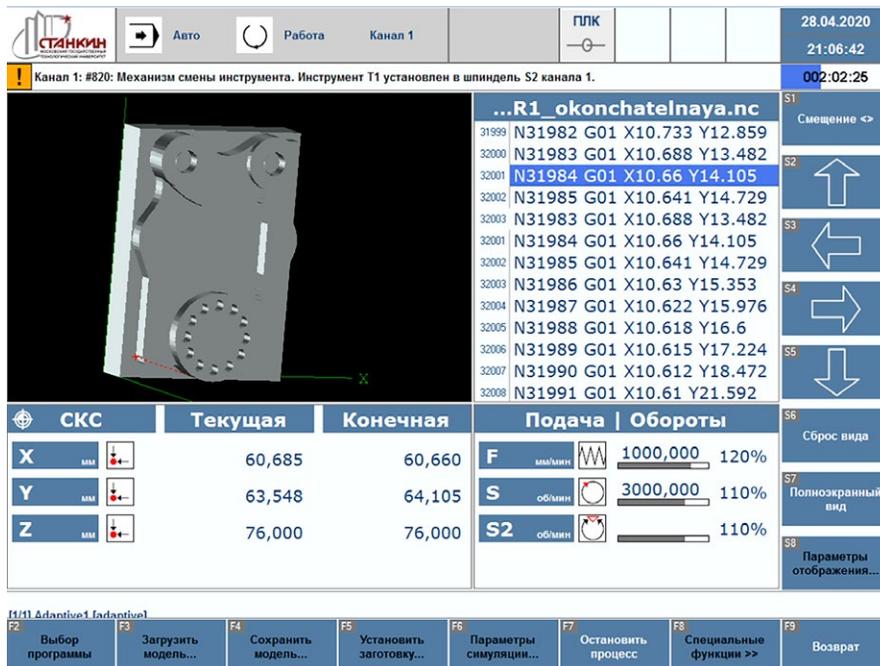


Рис. 7. 3D-визуализация в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол».  
Fig. 7. The 3D visualization in the AksioMA Kontrol CNC system.

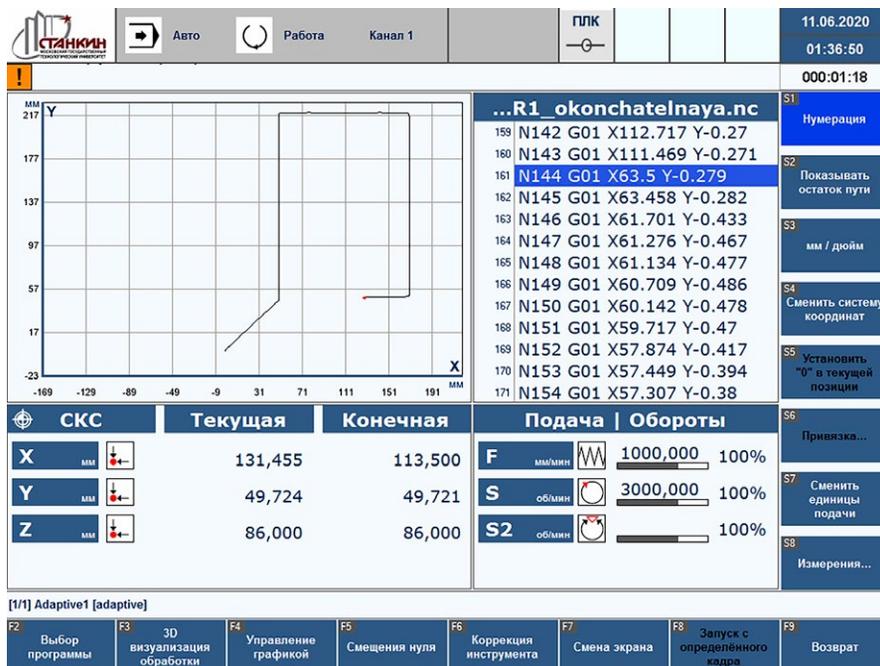


Рис. 8. 2D-визуализация в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол».  
Fig. 8. The 2D visualization in the AksioMA Kontrol CNC system.

крайне важна для отслеживания процесса обработки при многоканальном режиме. Также существует возможность установки смещения и многие другие возможности [10].

Имеется возможность отслеживать текущие и конечные координаты, параметры подачи, скорость вращения шпинделя.

Отсутствуют следующие возможности: возможность поиска ошибок благодаря точкам останова, локального воспроизведения симуляции конкретного участка [11]; возможность видеть реальные динамические характеристики в сравнении с программными, такие как подача и скорость вращения инструмента; возможность отслеживать это визуально и наглядно [12].

## Сравнение средств визуализации в рассмотренных системах ЧПУ

Далее представлена сводная таблица из рассмотренных систем ЧПУ. По вертикали расположены критерии, которые относятся к возможностям визуализации систем ЧПУ.

Из табл. 1 видно, что в большинстве систем ЧПУ нет реализации проведения анализа отклонений реальных значений координат от рассчитанных, что не позволяет производить анализ процесса обработки.

Также важно внедрить функциональную возможность, связанную с осуществлением контроля реальных показаний с датчиков положения. Это важно для понимания возможных отклонений в форме детали, анализе отклонения приводов. Помимо этого, необходимо иметь возможность сравнить траектории и произвести некоторый анализ наглядно.

Быстрая отрисовка имеет огромный смысл тогда, когда необходимо быстро оценить правильность кода управляющей программы на наличие простых ошибок, недочётов в позиционировании как модели заготовки, так и инструмента.

Также имеется необходимость осуществления функциональной возможности сохранять в файл изображение после визуализации процесса обработки. Это расширяет возможности системы в целом и значительно повышает уровень взаимодействия пользователя системы с самой системой.

Во всех системах ЧПУ есть реализация визуализации рассчитанной траектории, а также везде присутствует 2D- и 3D-визуализация. Из табл. 1 видно, что отсутствует визуализация реальной траектории у всех систем ЧПУ. Проведение анализа отклонений реальных значений координат от рассчитанных присутствует в системе ЧПУ *Heidenhein*, а также в ЧПУ «АксиОМА Контрол» при условии, что будет использоваться разрабатываемый модуль анализа траектории. Возможность расширения функциональности модуля визуализации доступна только в ЧПУ «АксиОМА Контрол», в других системах отсутствует, так как «АксиОМА Контрол» является открытой и гибкой системой, а другие имеют закрытый код. Также в табл. 1 можно увидеть отсутствие графы «Сохранение координат в файл .txt», которая присуща другим системам ЧПУ, кроме «АксиОМА Контрол», что позволяет провести полноценный анализ с рассчитанными и реальными координатами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена работа, в которой содержится решение задач по анализу траектории перемещения режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол». Проведённый в статье анализ выявил, что большинство систем ЧПУ не реализовало представленные функциональные возможности, что не позволяет производить полноценный анализ процесса обработки.

**Таблица 1.** Сравнение средств визуализации систем ЧПУ

**Table 1.** Comparison of means of visualization of the CNC systems

Критерии оценки \ Системы ЧПУ	SINUMERIK 840D	ITNC640 Heidenhein	FAGOR	АксиОМА Контрол
Визуализация в 2D/3D	+	+	+	+
Визуализация рассчитанной траектории	+	+	+	+
Визуализация реальной траектории	-	-	-	-
Проведение анализа отклонений реальных значений координат от рассчитанных	-	+	-	+(при использовании разработанного модуля анализа)
Возможность расширения функциональности модуля визуализации	-	-	-	+
Сохранение координат в файл .txt	-	-	-	+

Разработана структурная схема, на которой отображены основные элементы этой системы и взаимодействия между ними. Схема помогает графически увидеть, как файлы подгружаются в разрабатываемый модуль анализа и что происходит внутри модуля анализа, а точнее, как взаимодействуют модули друг с другом. Также схема демонстрирует вывод результатов анализа данных в отчёты (графики, файлы txt и xls). Была составлена диаграмма прецедентов, в которой отображены основные возможности инструмента для анализа.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** С.С. Гусев — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; В.В. Макаров — редактирование текста рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления: Учеб. пособие. — М. Логос, 2005. — 296 с.
2. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Программирование систем числового программного управления: Учеб. пособие. — М. Логос, 2008. — 344 с. + компакт-диск.
3. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. Автоматизация технологических процессов в машиностроении. Часть — I. Числовое программное управление. Учебное пособие по подготовке специалистов с высшим профессиональным образованием для кадрового перевооружения машиностроительного комплекса России. М.: МГТУ СТАНКИН. 2010. 203 с.
4. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. Автоматизация технологических процессов в машиностроении. Учебное пособие — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: МГТУ «Станкин», 2011. — 200 с.
5. Фрезерный инструмент: учеб. пособие / В.В. Морозов [и др.]; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. — 214 с.
6. Барбашов Ф.А. Фрезерное дело. Учебное пособие для сред. проф. техн. училищ. Изд. 2-е. М., «Высш. школа», 1975. 216 с. с ил.

## REFERENCES

1. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Sistemy chislovogo programmogo upravleniya: Ucheb. Posobie [Numerical control systems: Textbook] — M. Logos, 2005. — 296 p.
2. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Programirovanie sistem chislovogo programmogo upravleniya: Ucheb. Posobie [Programming of numerical control systems: Textbook] — M. Logos, 2008. — 344 p. + kompakt-disk.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** S.S. Gusev — search for publications, writing the text of the manuscript; V.V. Makarov — editing the text of the manuscript. Authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE international criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

7. Кувшинский В.В. Фрезерование. М., «Машиностроение», 1977. 240 с. с ил.
8. Мартинов Г. М., Козак Н.В., Нежметдинов Р. А., Любимов А.Б. Специфика построения панелей управления систем ЧПУ по типу универсальных программно-аппаратных компонентов // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 7. С. 34–40.
9. Нежметдинов Р.А., Соколов С.В., Обухов А.И., Григорьев А.С. Расширение функциональных возможностей систем ЧПУ для управления механо-лазерной обработкой // Автоматизация в промышленности. 2011. № 5. С. 49–53.
10. Мартинова Л.И., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л. Реализация открытости управления электроавтоматикой станков в системе ЧПУ класса PCNC // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 11–16.
11. Мартинов Г.М., Обухов А.И., Пушков Р.Л. Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 6. С. 42–50.
12. Гусев С.С., Макаров В.В. Анализ систем автоматического проектирования // Известия МГТУ «MAMI». 2024. Т. 18, № 1. С. 63–74.

3. Martinov G.M., Martinova L.I., Pushkov R.L. Avtomatizaciya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii. Chast' — I. Chislovoe programmnoe upravlenie. Uchebnoe posobie po podgotovke specialistov s vysshim professional'nym obrazovaniem dlya kadrovogo perevooruzheniya mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii [Automation of technologicfl processes in mechanical engineering. Part — I. Numerical control software. A textbook on the training

of specialists with higher professional education for personnel re-equipment of the machine-building complex of Russia] M.: MGТУ STANKIN. 2010. 203 p.

4. Martinov G.M., Martinova L.I., Pushkov R.L. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii. Uchebnoe posobi [Automation of technological processes in mechanical engineering. Study guide] — 2-e izd., pererab. i dop. — M.: MGТУ «Stankin», 2011. — 200 p.

5. Frezernyj instrument: ucheb. posobie [Milling tools: studies. stipend] / V.V. Morozov [i dr.]; Vladim. gos. un-t im. A.G. i N.G. Stoletovyh. — Vladimir: Izd-vo VIGU, 2014. — 214 p.

6. Barbashov F.A. Frezernoe delo. Uchebnoe posobie dlya sred. prof. tekhn. Uchilishch [Milling business. A textbook for the medium. prof. tech. schools.] Izd. 2-e. M., «Vyssh. shkola», 1975. 216 p. s il.

7. Kuvshinskij V.V. Frezerovanie. M., «Mashinostroenie» [«Mechanical Engineering»] 1977. 240 p. s il.

8. Martinov G.M., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Lyubimov A.B. Specifika postroeniya panelej upravleniya sistem CHPU po tipu universal'nyh programmno-apparatnyh komponentov [The specifics of building control panels of CNC systems by the type of universal hardware and software components] //

Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii. 2010. № 7. pp. 34–40.

9. Nezhmetdinov R.A., Sokolov S.V., Obuhov A.I., Grigor'ev A.S. Rasshirenie funktsional'nyh vozmozhnostej sistem CHPU dlya upravleniya mekhanolazernoj obrabotkoj [Expanding the functionality of CNC systems for controlling mechanical laser processing] // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2011. № 5. pp. 49–53.

10. Martinova L.I., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Pushkov R.L. Realizatsiya otkrytosti upravleniya elektroavtomatikoj stankov v sisteme CHPU klassa PCNC [Implementation of openness of control of electroautomatics of machine tools in the PCNC class CNC system] // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2011. № 2. pp. 11–16.

11. Martinov G.M., Obuhov A.I., Pushkov R.L. Princip postroeniya universal'nogo interpretatora yazyka programmirovaniya vysokogo urovnya dlya sistem CHPU [The principle of building a universal high-level programming language interpreter for CNC systems] // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2010. № 6. pp. 42–50.

12. Gusev S.S., Makarov V.V. Analiz sistem avtomaticheskogo proektirovaniya [Analysis of automatic design systems] // Izvestiya MGТУ «МАМИ». 2024. T. 18, №1. pp. 63–74.

## ОБ АВТОРАХ

### \* Гусев Сергей Сергеевич,

инженер-энергетик отдела энергетиков;  
адрес: Российская Федерация, 123298, Москва,  
ул. 3-я Хорошевская, д. 17, корп. 1;  
ORCID: 0000-0002-6070-9295;  
eLibrary SPIN: 8934-1568;  
e-mail: gs-serg@mail.ru

### Макаров Вадим Владимирович,

доцент, канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник лаборатории Идентификации  
систем управления №41;  
ORCID: 0000-0003-4874-5418;  
eLibrary SPIN: 5787-3977;  
e-mail: makfone@mail.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Sergey S. Gusev,

Energy Engineer of the Energy Department;  
address: 17 bldg. 1, 3<sup>rd</sup> Khoroshevskaya street, 123298 Moscow,  
Russian Federation;  
ORCID: 0000-0002-6070-9295;  
eLibrary SPIN: 8934-1568;  
e-mail: gs-serg@mail.ru

### Vadim V. Makarov,

Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),  
Senior Researcher of the Identification of Control Systems  
Laboratory №41;  
ORCID: 0000-0003-4874-5418;  
eLibrary SPIN: 5787-3977;  
e-mail: makfone@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author