



Scan to know paper details and  
author's profile

# Development of a Structural Model for Constructing a Cutting Tool Trajectory Analysis Module in the Axiom Control CNC System

*Gusev Sergey Sergeevich*

## ABSTRACT

**Justification.** Currently, metalworking machines are used in various industries. The operation of these machines, designed for numerical control (CNC), is impossible without the use of appropriate systems that allow for the operational configuration of the system to solve various technological problems by controlling the machine's drives.

The purpose of this work is to comprehensively analyze the functionality of the Axiom Control CNC visualization module in order to identify its strengths and weaknesses compared to similar systems on the market. In the course of the research, a detailed review of existing technologies and visualization methods used in numerical control systems will be conducted, which will allow for a deeper understanding of current trends and needs in this area. Materials and methods. To achieve this goal, the following task has been set, aimed at expanding the functionality of the cutting tool rendering module in the Axiom Control CNC system, namely, the analysis of existing visualization tools for the trajectory of cutting tools in CNC systems.

**Keywords:** manufacturing, industry, metalworking, technological tasks, visualization of the axiom control CNC system.

**Classification:** DCC Code: 621.902

**Language:** English



Great Britain  
Journals Press

LJP Copyright ID: 392941

Print ISSN: 2631-8474

Online ISSN: 2631-8482

London Journal of Engineering Research

Volume 25 | Issue 4 | Compilation 1.0





# Development of a Structural Model for Constructing a Cutting Tool Trajectory Analysis Module in the Axiom Control CNC System

Разработка Структурной Модели Построения Модуля Анализа Траектории Режущего Инструмента В Системе Чпу «аксиома Контрол»

Gusev Sergey Sergeevich

## ABSTRACT

*Justification. Currently, metalworking machines are used in various industries. The operation of these machines, designed for numerical control (CNC), is impossible without the use of appropriate systems that allow for the operational configuration of the system to solve various technological problems by controlling the machine's drives.*

*The purpose of this work is to comprehensively analyze the functionality of the Axiom Control CNC visualization module in order to identify its strengths and weaknesses compared to similar systems on the market. In the course of the research, a detailed review of existing technologies and visualization methods used in numerical control systems will be conducted, which will allow for a deeper understanding of current trends and needs in this area. Materials and methods. To achieve this goal, the following task has been set, aimed at expanding the functionality of the cutting tool rendering module in the Axiom Control CNC system, namely, the analysis of existing visualization tools for the trajectory of cutting tools in CNC systems.*

## АННОТАЦИЯ

*Обоснование. В настоящее время в различных отраслях промышленности используются станки для металлообработки. Работа этих станков, рассчитанных на числовое программное управление (ЧПУ) невозможна без*

*использования соответствующих систем, которые позволяют осуществлять оперативное конфигурирование системы для решения различных технологических задач путем управления приводами станка.*

*Цель данной работы заключается в комплексном анализе функциональных возможностей модуля визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» с целью выявления его сильных и слабых сторон по сравнению с аналогичными системами на рынке. В процессе исследования будет проведен детальный обзор существующих технологий и методов визуализации, используемых в системах числового программного управления, что позволит глубже понять текущие тенденции и потребности в данной области.*

*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.*

*Keywords:* manufacturing, industry, metalworking, technological tasks, visualization of the axiom control CNC system.

*Ключевые слова:* производство, промышленность, металлообработка, технологические

технологические задачи, визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол».

*Author:* PJSC «Rostelecom», candidate for a degree, Energy Engineer.

*Сведения об авторах:* ПАО «Ростелеком», соискатель, инженер-энергетик отдела энергетиков,

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современном промышленном производстве станки для металлообработки занимают центральное место в процессе создания высококачественной продукции. Особенно выделяются станки с ЧПУ, которые характеризуются высокой точностью, эффективностью и надежностью. Эти преимущества делают их незаменимыми в таких критически важных отраслях, как аэрокосмическая промышленность, производство медицинских приборов, автомобилестроение, а также в военной и оборонной технике.

Эффективная эксплуатация станков с ЧПУ невозможна без интеграции сложных систем управления, которые обеспечивают оперативное конфигурирование для выполнения разнообразных технологических задач. Эти системы управления играют ключевую роль в процессе автоматизации, позволяя точно контролировать работу приводов станка и обеспечивая высокую степень согласованности между различными компонентами производственного процесса.

В существующей литературе представлено множество подходов к управлению металлорежущими станками, что свидетельствует о разнообразии методов и технологий, используемых в данной области. В частности, описаны принципы построения и функциональные возможности систем ЧПУ, включая их конструктивные особенности и алгоритмы управления. Эти исследования подчеркивают важность разработки и внедрения инновационных решений, направленных на оптимизацию процессов

управления и повышения общей производительности.

Кроме того, современные системы ЧПУ все чаще интегрируются с передовыми технологиями, такими как искусственный интеллект и машинное обучение, что открывает новые горизонты для повышения эффективности и качества обработки материалов. Эти инновации позволяют не только улучшить точность обработки, но и снизить затраты на производство, что является важным фактором в условиях жесткой конкуренции на рынке.

Таким образом, дальнейшее развитие технологий управления станками с ЧПУ и их интеграция с современными информационными системами представляют собой важные направления для повышения конкурентоспособности и эффективности производственных процессов в различных отраслях [1].

В данной работе мы сосредоточимся на функциональных возможностях модуля визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол», проводя сравнительный анализ с другими известными системами аналогичного типа. Основная цель исследования заключается в расширении функциональных возможностей модуля, отвечающего за отрисовку траектории режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол». В частности, мы будем анализировать существующие средства визуализации траектории режущего инструмента, используемые в различных системах ЧПУ, чтобы выявить их сильные и слабые стороны.

Научная новизна данной работы заключается в разработке методики анализа траектории режущего инструмента, которая отличается уникальной реализацией алгоритмов и представлением данных. Это позволит не только повысить точность визуализации, но и улучшить взаимодействие пользователя с системой, сделав процесс управления более интуитивным и эффективным. Мы уверены, что предложенные усовершенствования

откроют новые горизонты для применения системы «АксиОМА Контрол» в различных отраслях, способствуя повышению качества и эффективности производственных процессов.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель данной работы заключается в комплексном анализе функциональных возможностей модуля визуализации системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» с целью выявления его сильных и слабых сторон по сравнению с аналогичными системами на рынке. В процессе исследования будет проведен детальный обзор существующих технологий и методов визуализации, используемых в системах числового программного управления, что позволит глубже понять текущие тенденции и потребности в данной области.

Кроме того, особое внимание будет уделено разработке модуля анализа траектории перемещения режущего инструмента, который станет неотъемлемой частью модуля визуализации. Этот новый функционал направлен на автоматизацию процесса анализа и улучшение точности визуализации, что в свою очередь позволит операторам более эффективно контролировать и оптимизировать производственные процессы.

В результате выполнения работы планируется не только расширить функциональные возможности модуля визуализации, но и предложить рекомендации по его дальнейшему развитию, что обеспечит более высокую степень интеграции с другими компонентами системы ЧПУ и повысит общую производительность и качество обработки материалов. Таким образом, данная работа будет способствовать созданию более совершенной и конкурентоспособной системы ЧПУ «АксиОМА Контрол».

## III. РАЗРАБОТКА ДИАГРАММЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ МОДУЛЯ АНАЛИЗА

Непосредственно перед началом разработки построена диаграмма прецедентов модуля анализа, главная задача, которой, состоит в

описании функциональности разрабатываемого компонента и структурной схемы, предназначение которой состоит в наглядном представлении взаимодействия частей модуля анализа в основных режимах работы.

Для разработки модуля анализа траектории режущего инструмента, в первую очередь необходимо определить основные функциональные требования разрабатываемого приложения [2]. На рис. 1 представлена полная диаграмма прецедентов. Проведения пользователем анализа, в принципе невозможно без поступления каких-либо входных данных, следовательно, самый первый прецедент должен отражать обеспечение данной функциональности. Вследствие этого, сформирован прецедент «Обработка входных данных», который включает в себя:

- прием файла с реальными координатами;
- прием файла с рассчитанными координатами;
- осуществление предварительной проверки данных на корректность их ввода.

После поступления входных данных, чтобы провести их анализ, необходимо осуществить над ними некоторые манипуляции, для этого необходимо внедрить алгоритмы работы, по которым выполняется анализ. Все это содержит прецедент «Выполнение расчетов», в который входят:

- расчет отклонений между реальными и рассчитанными координатами;
- вычисление среднеквадратического отклонения;
- выполнение алгоритма k-средних за счет машинного обучения.

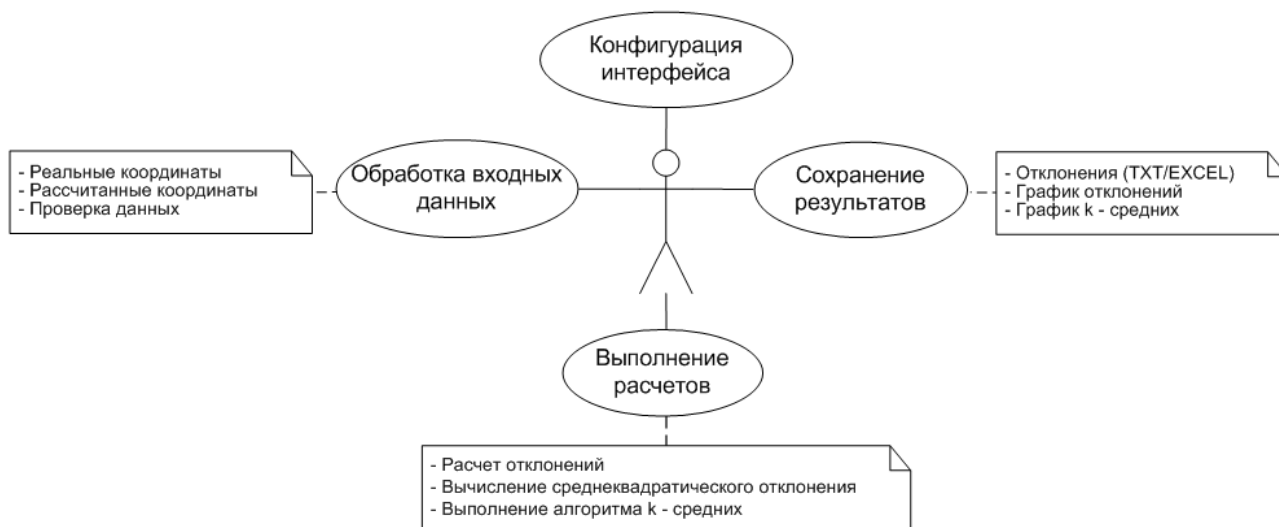
Для полноценной работы с модулем анализа у пользователя должна быть возможность сохранить полученные результаты (прецедент «Сохранение результатов»), а именно:

- рассчитанных модулем отклонений, для удобства в форматах TXT или EXCEL;
- графика построенного по отклонениям
- графика с результатами работы алгоритма k-средних.

Разумеется, так как разрабатываемый модуль для взаимодействия с элементами (прецедент анализа является веб-приложением, он «конфигурация интерфейса»).

должен иметь масштабируемый интерфейс

**Диаграмма прецедентов модуля анализа**

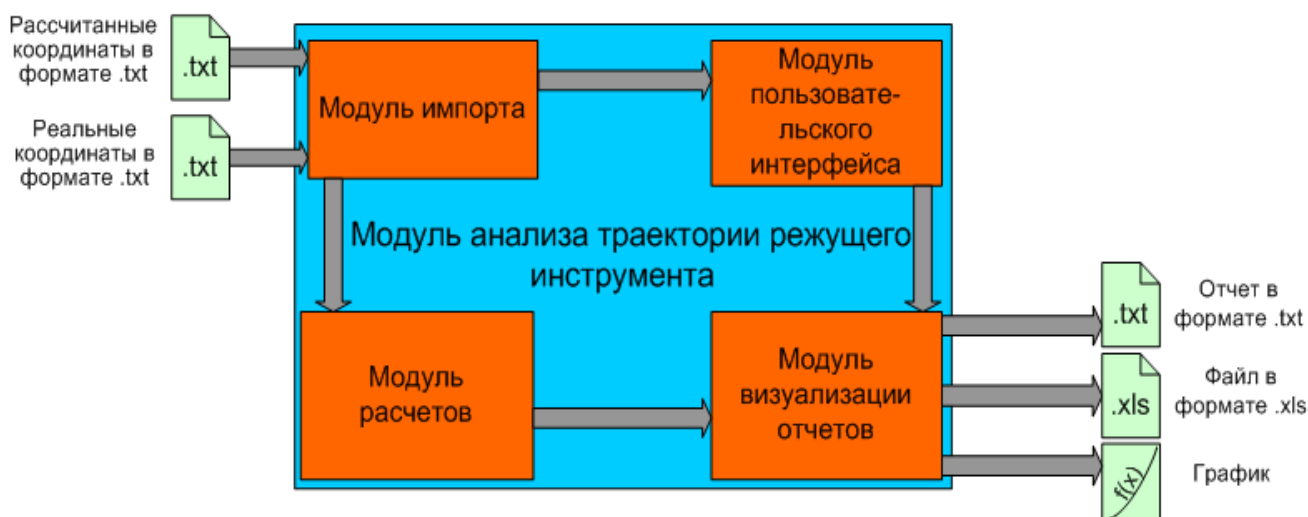


*Рис. 1:* Диаграмма прецедентов модуля анализа

#### IV. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДУЛЯ АНАЛИЗА ТРАЕКТОРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

приведенная на рис. 2, отражает общее взаимодействие компонентов и разрабатываемого модуля, отвечающего за выполнение анализа траектории режущего инструмента.

Структурная схема модуля анализа траектории режущего инструмента,



*Рис. 2:* Структурная схема модуля анализа траектории режущего инструмента

В представленной структурной схеме модуля анализа траектории режущего инструмента, продемонстрирована общая связь между модулями. Работа представленного модуля

анализа начинается с загрузки входных данных.

Входные данные представляют собой два текстовых документа выгруженных из

системы ЧПУ «АксиОМА Контрол», которые содержат значения реальных и рассчитанных координат. Далее файлы загружаются в модуль импорта, который в свою очередь осуществляет предварительную проверку данных на наличие ошибок. Производится проверка файлов на различные ошибки, разное количество строк координат, отсутствие оси, некорректно загруженный формат документов. При этом, за графическое представление всех элементов в веб-приложении отвечает модуль пользовательского интерфейса [3].

После загрузки и проверки координат данные обрабатываются модулем расчетов, задача которого проводить анализ данных через работу встроенных разработчиком алгоритмов. Также в модуль расчетов входят любые расчеты, связанные со счетом, например, расчет отклонения между реальными и рассчитанными координатами. Анализ по алгоритмам, которые будут введены в модуль расчетов, можно будет графически увидеть в модуле пользовательского интерфейса.

Пользовательский интерфейс будет демонстрировать любое действие графически, загрузку входных данных, а именно реальных и рассчитанных координат, рассчитанные отклонения, также графически отображать алгоритмы, графики и все кнопки действий. Режущий инструмент (РИ) связан с модулем визуализации отчетов.

После проведения анализа за представление и сохранение результатов работы отвечает модуль визуализации отчетов. Данный модуль должен выводить сохранение различных посчитанных отклонений в файлы различного типа. Также предоставлять возможность производить сохранение графика в отдельный файл, для проведения дальнейшего анализа траектории. На выводе из модуля визуализации отчетов, можно вывести три файла, а именно: отчет в формате \*.txt, файл в виде \*.xls, а также выводить график в формате изображения.

## V. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ТРАЕКТОРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

### 5.1 Проведение анализа траектории режущего инструмента с помощью «среднеквадратичного отклонения»

Среднеквадратическое отклонение – в теории вероятности и статистики, самый распространенный показатель рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания. Указанные термины обозначают корень квадратный из дисперсии случайной величины, и иногда могут означать вариант оценки этого значения. Обозначается  $\sigma$  (сигма) или S [4].

Среднеквадратическое отклонение представляет собой важный статистический показатель, который измеряется в тех же единицах, что и сама случайная величина. Этот параметр играет ключевую роль в различных областях статистики и применяется в ряде аналитических задач. Среднеквадратическое отклонение используется, например, для расчета стандартной ошибки среднего арифметического, что позволяет оценить надежность полученного среднего значения выборки.

Кроме того, среднеквадратическое отклонение является неотъемлемым элементом при построении доверительных интервалов, которые дают возможность оценить диапазон, в котором с заданной вероятностью находится истинное значение параметра генеральной совокупности. В контексте статистической проверки гипотез среднеквадратическое отклонение также служит критерием для определения значимости результатов, позволяя исследователям делать выводы о наличии или отсутствии статистически значимых различий между группами.

Среднеквадратическое отклонение оценивает степень разброса значений в наборе данных относительно среднего значения. Чем больше значение среднеквадратического отклонения,

тем больше рассеяние данных: это указывает на то, что значения сильно отличаются от среднего. В то время как малое значение среднеквадратического отклонения говорит о том, что данные сконцентрированы близко к среднему значению.

Таким образом, среднеквадратическое отклонение является важным инструментом для анализа данных, позволяя исследователям и аналитикам глубже понять структуру и характеристики исследуемых величин. Его применение охватывает широкий спектр дисциплин, от экономики до биостатистики, и обеспечивает более точное и информированное принятие решений на основе статистических данных.

Если  $x_i$  это  $i$ -й элемент выборки,  $n$ -объем выборки, а  $\bar{x}$  — это среднее арифметическое выборки:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n)$$

То стандартное отклонение на основании смещённой оценки дисперсии (иногда называемой просто выборочной дисперсией), будет записываться следующим образом:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Если говорить в прямом смысле, то это среднеквадратическое разностей измеренных значений и среднего значения.

Среднеквадратическое отклонение является важным статистическим показателем, который предоставляет ценную информацию о распределении данных в наборе измерений. Оно позволяет оценить, насколько сильно отдельные значения отклоняются от среднего арифметического, тем самым демонстрируя степень вариативности в данных.

Среднеквадратическое отклонение является одним из наиболее распространенных и информативных статистических показателей, используемых для анализа разброса данных в различных областях науки и практики. Оно предоставляет ценную информацию о вариативности набора данных, позволяя исследователям оценить степень отклонения отдельных значений от среднего. Важно отметить, что среднеквадратическое отклонение не только служит инструментом для вычисления разброса, но и помогает выявлять аномальные значения, которые существенно отличаются от среднестатистических.

Аномальные значения, или выбросы, могут проявляться как чрезмерно высокие, так и низкие отклонения, что может указывать на различные проблемы в процессе сбора данных. Например, в медицинских исследованиях, где анализируются показатели здоровья, такие как уровень холестерина или артериальное давление, отклонения от нормальных значений могут сигнализировать о наличии патологии или изменениях в состоянии здоровья пациентов. Эти аномалии требуют особого внимания, поскольку они могут указывать на ошибки в измерениях, наличие систематических сбоев в оборудовании или влияние внешних факторов, таких как стресс или диета, на результаты.

Кроме того, использование среднеквадратического отклонения в сочетании с другими статистическими методами, такими как анализ вариации, корреляционный и регрессионный анализ, может значительно повысить точность и надежность выводов. Например, в контексте клинических испытаний применение среднеквадратического отклонения позволяет исследователям более точно оценивать эффективность новых лекарств, выявляя как общие тенденции, так и индивидуальные реакции пациентов на лечение.

Также стоит отметить, что в современных исследованиях, особенно в области больших

данных и машинного обучения, среднеквадратическое отклонение служит основой для более сложных методов анализа, таких как метод главных компонент и алгоритмы кластеризации. Эти методы позволяют не только анализировать данные, но и визуализировать их, что значительно упрощает процесс интерпретации результатов и принятия решений [5].

Таким образом, среднеквадратическое отклонение является не просто статистическим инструментом для оценки разброса данных, но и важным элементом в процессе принятия обоснованных решений. Оно помогает исследователям и аналитикам выявлять закономерности, определять нормальные и аномальные значения, а также проводить более глубокий анализ данных. В условиях, когда высокая степень доверия к результатам исследований имеет критическое значение, использование среднеквадратического отклонения в сочетании с другими статистическими методами становится особенно актуальным, способствуя более точному и надежному пониманию исследуемых явлений и процессов.

## 5.2 Применение метода «k-средних» для анализа траектории режущего инструмента

Метод k-средних (k-means) представляет собой один из наиболее популярных алгоритмов кластерного анализа, который нацелен на разделение  $m$  наблюдений на  $k$  кластеров (рис. 3). Основная задача этого метода заключается в том, чтобы каждое наблюдение было отнесено к тому кластеру, центроид которого находится ближе всего к данному наблюдению. Это позволяет эффективно группировать данные, основываясь на их схожести.

Принцип работы алгоритма k-средних заключается в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек данных от центров кластеров, что выражается через функцию потерь. Алгоритм последовательно обновляет положение центроидов, чтобы

достичь наилучшего возможного разделения данных. В начале процесса выбирается  $k$  случайных центроидов, после чего каждое наблюдение классифицируется в соответствии с ближайшим центроидом. Затем центроиды обновляются, вычисляя среднее значение всех точек, относящихся к каждому кластеру. Этот процесс повторяется до тех пор, пока изменения в центрах кластеров не станут незначительными или не достигнут заранее заданного числа итераций [6].

Метод k-средних имеет ряд преимуществ, таких как простота реализации и высокая скорость обработки, что делает его особенно подходящим для работы с большими наборами данных. Тем не менее, он также имеет свои ограничения. Например, результаты алгоритма могут зависеть от начальных значений центроидов, что может привести к различным результатам при каждом запуске. Кроме того, метод требует предварительного задания количества кластеров  $k$ , что может быть затруднительно в условиях неопределенности.

Для преодоления этих ограничений исследователи разрабатывают различные модификации и улучшения алгоритма k-средних, такие как метод k-средних++ для более эффективного выбора начальных центроидов или использование методов оценки, таких как метод локтя, для определения оптимального числа кластеров. Эти усовершенствования помогают повысить точность и надежность кластеризации, что делает метод k-средних мощным инструментом для анализа данных в различных областях, включая маркетинг, биоинформатику и социальные науки.

Действие алгоритма таково, что он стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров:

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} (x - \mu_i)^2$$

где  $k$  - число кластеров,  $S_i$  - полученные кластеры,  $i=1, 2, \dots, k$ , а  $\mu_i$  - центры масс всех векторов  $x$  из кластера  $S_i$ .

Алгоритм разделительной кластеризации, также известный как метод  $k$ -средних, представляет собой подход к разбиению множества элементов в векторном пространстве на заранее заданное количество кластеров  $k$ . Данный метод относится к классу неиерархических алгоритмов кластеризации, что делает его особенно популярным в задачах, где необходимо быстро и эффективно группировать данные.

*Процесс работы алгоритма можно описать как итерационную процедуру, состоящую из нескольких ключевых этапов:*

1. Определение числа кластеров  $k$ : На первом этапе пользователь или исследователь задает количество кластеров, на которое необходимо разбить данные. Выбор этого параметра может зависеть от специфики задачи и предварительного анализа данных.
2. Инициализация центров кластеров: Из исходного набора данных случайным образом выбираются  $k$  записей, которые будут служить начальными центрами кластеров. Этот этап важен, так как начальные значения могут существенно повлиять на конечный результат кластеризации.
3. Присвоение записей кластерам: На следующем этапе для каждой записи из исходной выборки определяется ближайший к ней центр кластера. Это делается с использованием метрики расстояния, чаще всего евклидова расстояния. Записи, которые ближе всего к определенному центру, образуют начальные кластеры. На этом этапе происходит первичное распределение данных по кластерам.
4. Вычисление центроидов: После того как записи были распределены по кластерам, вычисляются центроиды (центры тяжести) для каждого кластера. Каждый центроид

представляет собой вектор, элементы которого являются средними значениями признаков, рассчитанными по всем записям, входящим в соответствующий кластер. Затем центры кластеров обновляются, смещаясь в сторону вычисленных центроидов.

5. Итерация и сходимость: Процесс повторяется, начиная с этапа присвоения записей кластерам, до тех пор, пока границы кластеров не перестанут изменяться от итерации к итерации. Это означает, что на каждой итерации в каждом кластере будет оставаться один и тот же набор записей, что сигнализирует о сходимости алгоритма.

Алгоритм  $k$ -средних обладает рядом преимуществ, включая простоту реализации и скорость работы, что делает его подходящим для обработки больших объемов данных. Тем не менее, он также имеет свои ограничения, такие как чувствительность к выбору начальных центров и необходимость задавать количество кластеров заранее. Кроме того, алгоритм предполагает, что кластеры имеют сферическую форму и одинаковый размер, что может не всегда соответствовать реальным данным.

Для повышения устойчивости и эффективности алгоритма в практике часто применяются различные методы и техники, такие как инициализация с помощью метода  $k$ -средних, который улучшает выбор начальных центров, или использование различных метрик расстояния для более точного определения близости между записями. Таким образом, алгоритм разделительной кластеризации продолжает оставаться актуальным инструментом в области анализа данных и машинного обучения, позволяя исследователям эффективно группировать данные и выявлять скрытые закономерности [7].

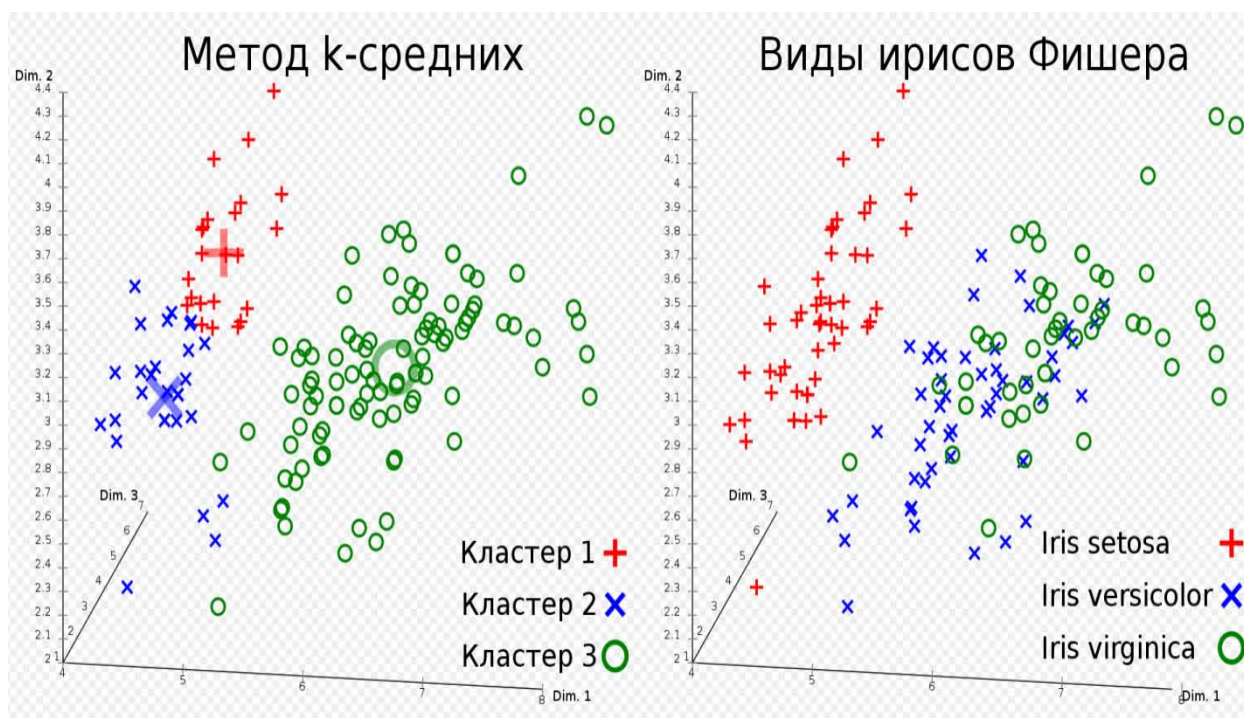


Рис. 3: Пример кластеризации методом k-средних

Одним из основных достоинств метода k-средних является его простота, которая проявляется в высокой скорости выполнения и эффективности по сравнению с другими алгоритмами кластеризации, особенно при обработке крупных наборов данных. Этот метод позволяет быстро и эффективно разделять данные на группы, что делает его особенно полезным в условиях, когда необходимо обрабатывать большие объемы информации.

Метод k-средних может служить начальным этапом для предварительного разбиения больших массивов данных на кластеры. После этого этапа можно проводить более сложный и мощный кластерный анализ подкластеров, что позволяет углубить понимание структуры данных и выявить более тонкие закономерности. Такой подход способствует более детальному изучению данных и может привести к обнаружению скрытых взаимосвязей, которые не были очевидны на первом этапе анализа [8].

Кроме того, метод k-средних может быть использован для оценки оптимального количества кластеров, что является важным шагом в процессе кластеризации. Он

позволяет «прикинуть» количество кластеров, а также выявить потенциальные неучтенные данные и связи в наборах. Это особенно актуально в ситуациях, когда исследователь сталкивается с большими и сложными данными, где традиционные методы анализа могут оказаться недостаточно эффективными.

Таким образом, метод k-средних не только обеспечивает быструю и эффективную кластеризацию, но и открывает новые возможности для более глубокого анализа данных. Его применение может значительно улучшить результаты исследований в различных областях, таких как маркетинг, биоинформатика и социальные науки, где важно выявление закономерностей и структур в больших объемах информации.

## VI. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ТРАЕКТОРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО МОДУЛЯ

Методика анализа траектории режущего инструмента с использованием разрабатываемого модуля представлена на рис. 4.

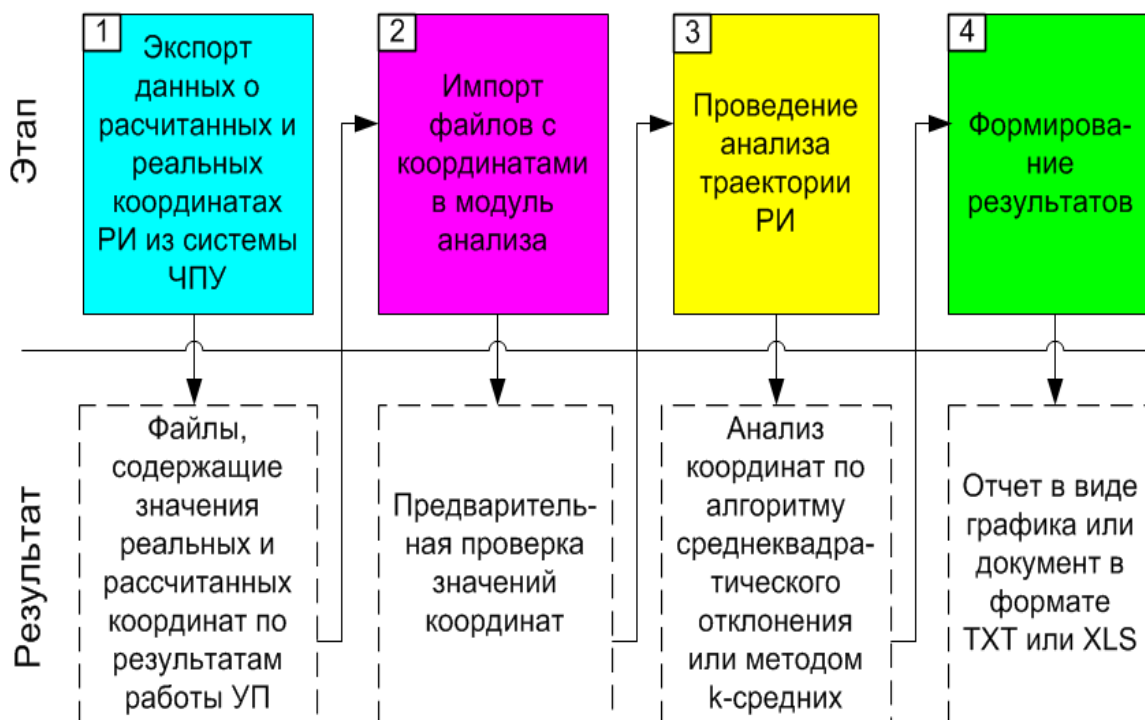


Рис. 4: Методика анализа траектории режущего инструмента с использованием разрабатываемого модуля

Первоначально осуществляется экспорт данных о рассчитанных и реальных координатах режущего инструмента из системы ЧПУ «АксиОМА Контрол». В результате этого процесса формируются текстовые файлы (\*.txt), содержащие значения реальных и рассчитанных координат, полученные по итогам выполнения управляющей программы (УП). Эти координаты можно извлечь из специального режима измерений в системе ЧПУ, что позволяет получать данные за заданный промежуток времени. Важно отметить, что данные файлы извлекаются непосредственно из ЧПУ и не зависят от разрабатываемого модуля [9].

Далее происходит импорт файлов с координатами в модуль анализа. Перед дальнейшей обработкой данные проходят предварительную проверку на корректность. Система должна выявлять ошибки,

возникающие из-за неправильного заполнения данных или некорректного формата файлов.

Затем осуществляется анализ траектории режущего инструмента путем вычисления отклонений, представляющих собой разницу между рассчитанными и реальными координатами. Кроме того, координаты могут быть проанализированы с использованием алгоритма среднеквадратического отклонения или метода k-средних [10].

В заключение формируется отчет, который позволяет сохранить полученные данные. Эти данные могут быть представлены в виде графиков, текстового отчета в формате \*.txt или в формате XLS-файла [11].

Алгоритм работы разрабатываемого модуля анализа траектории режущего инструмента представлен на рис. 5.

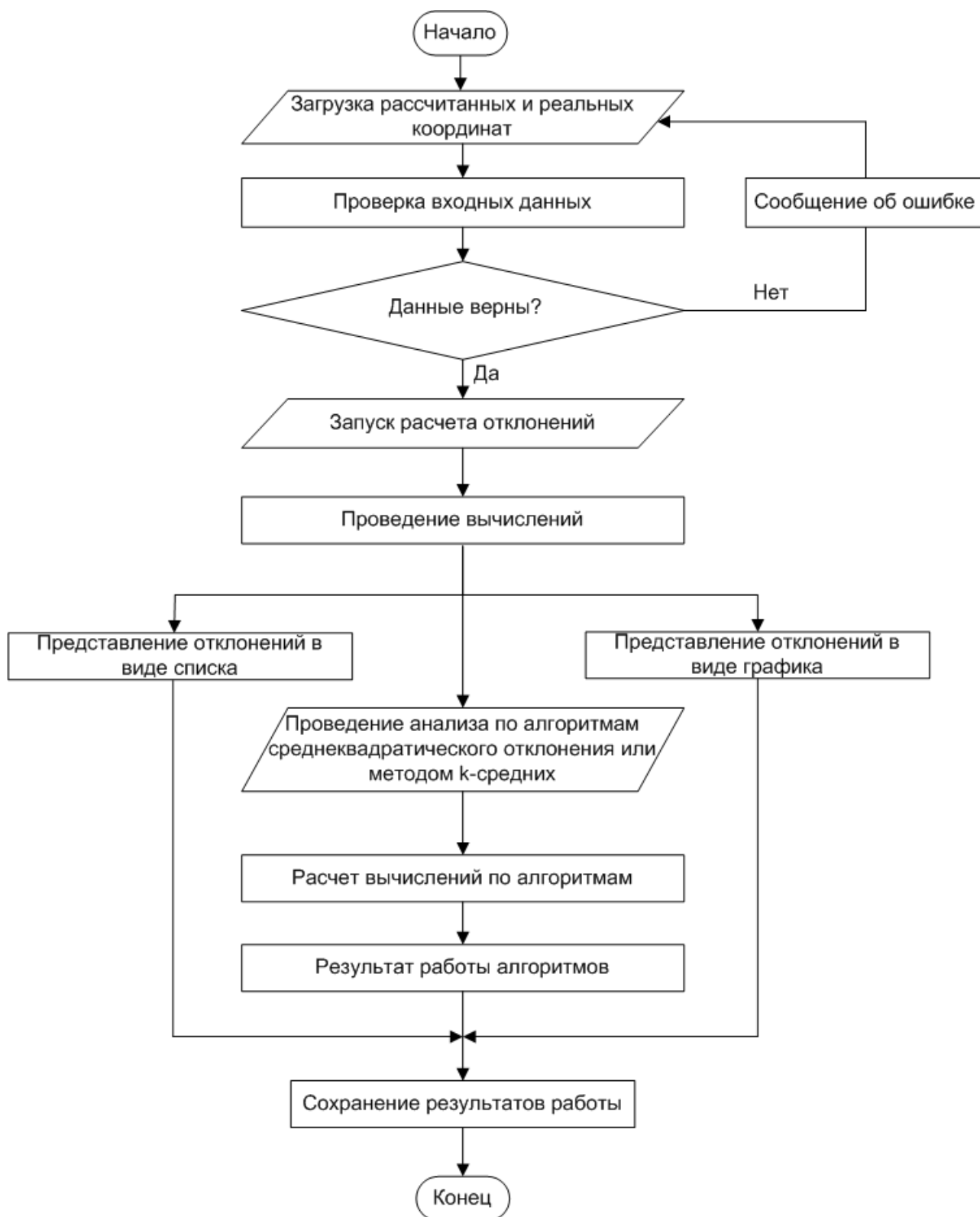


Рис. 5: Алгоритм работы разрабатываемого модуля анализа

Описание алгоритма:

1. Перед началом работы с модулем анализа пользователь должен осуществить загрузку файлов с реальными и рассчитанными координатами.

2. После чего проводится проверка входных данных на соответствие определенным требованиям, в случае если данные не корректны или же загружен не тот формат документа, то пользователь получает

уведомление об ошибке, после чего нужно заново повторить процедуру загрузки файлов либо провести редактирование в окне программы.

3. Далее пользователь путем нажатия соответствующей кнопки запускает процесс вычисления отклонений.
4. Полученные отклонения представляются в поле «Отклонения» в виде списка. При необходимости, их можно представить в виде графика.
5. Затем проводится анализ и расчет вычислений по алгоритмам среднеквадратического отклонения или методом k-средних.
6. В заключение после работы с модулем анализа следует сохранение результатов работы.

## VII. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЯ АНАЛИЗА ТРАЕКТОРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЧПУ «АКСИОМА КОНТРОЛ»

### 7.1 Выбор инструментальных средств разработки

Для разработки модуля анализа траектории режущего инструмента была выбрана среда разработки, которая называется Visual Studio Code. В ней производится редактирование начального кода, в которой можно создавать приложения, которые будут работать на нескольких системах, например, такие как WEB, или приложения с названием - облачные. Основными факторами, повлиявшими на выбор среды, являлись: бесплатность, адаптация под ОС Windows, много различных настроек всей программы и интерфейса, расширяемая библиотека дополнений и готовых решений, также редактор поддерживает большинство популярных языков, которые используются для создания приложений, а еще это простая и гибкая среда разработки. Учитывая все функции и свойства Visual Studio Code, он отлично подходит для WEB-разработки, и для разработки инструмента выбран язык программирования JavaScript, который

взаимодействует и поддерживается выбранной средой [12].

Когда нужно реализовать WEB-приложение, для этой цели хорошо подходит такой язык программирования как JavaScript, он используется наиболее часто в отличие от других языков, потому что заточен на веб-разработку, также среди основных особенностей можно выделить следующие:

- Необходимость для WEB- разработки. Этот язык взаимодействует с любыми популярными браузерами и поддерживает всех их скрипты. Также присутствует взаимодействие с HTML, CSS, а также и с серверной частью.
- JavaScript за счет своей скорости, а также производительности, может в какой-то мере обрабатывать страницы на программном обеспечении (ПО) пользователя, при этом не обращаясь на сервер. Это помогает снижать нагрузку на сервер, экономит вместе с этим время, а также трафик.
- В открытом доступе имеется очень большой список уже готовых решений, поэтому при работе в JavaScript легче стало использовать библиотеки, посредством взаимодействия с ними.
- Незамысловатое, и целесообразное применение.
- Пользовательский интерфейс имеет очень удобный внешний вид. В нем присутствует заполнение формы, также есть активация разнообразных кнопок, выбор различных действий, проверка ввода данных, а еще реагирование на наведение в определенную область или, например, на клик мыши.
- Лёгкость освоения, а также опыт работы с этим языком программирования.

Программа, которая написана на JavaScript именуется как скрипт. Скрипт имеет возможность встраиваться в язык разметки HTML, и запускается автоматически, когда загружается WEB-страница, выполняется он в виде самого простого текста [13]. Для того, чтобы запустить скрипт не нужно

специализированного ПО, а также не надо производить компиляцию для запуска. В этом и есть отличие JavaScript от Java. Выбранный язык может запускаться где угодно, например, в браузере или на сервере, а также на других устройствах, если оно содержит специальную программу, под названием «движок» JavaScript.

JavaScript является «безопасным», он не дает возможности низкоуровневого доступа к памяти, а также процессору, и создавался с такой целью, потому что браузеры этого не требуют [14].

Потенциал языка зависит от библиотек, которые используются в работе, в разработке модуля будет использоваться библиотека React. В браузере, когда используется JavaScript, у ПО есть связь с пользователем, а также WEB-сервером. Данный язык имеет возможность встраивать HTML (код), изменить содержимое, которое уже есть в наличии, или улучшить стиль. Реагирует на любые воздействия пользователя, которые были описаны ранее. Имеет возможность отправить сетевой запрос на удаленный сервер, скачать или загрузить различные файлы. Получить и установить cookie, задать вопросы человеку, который посетил страницу, продемонстрировать различные сообщения, а также может запомнить данные, имеющиеся на стороне клиента [15].

## 7.2 Алгоритм функционирования процесса преобразования с использованием библиотеки функций

Загружаемые в модуль файлы представляют собой два файла в формате \*.txt, которые содержат значения рассчитанных и реальных координат из системы ЧПУ «Аксиома Контрол». Файлы координат состоят из набора строк, в каждой строке содержатся данные о координатах X, Y и Z. Также, в каждой строке координата записана через пробел, значения могут быть как целые, так и десятичные. После последней координаты пробела не следует, сразу происходит переход к следующим координатам. Модуль производит

проверку файла на правильный формат файла, если он не соответствует формату \*.txt система выдает ошибку о неверном формате загружаемого файла. Также происходит проверка файла на корректность заполнения, например, если текстовый документ будет состоять не из цифр, который представляет собой набор координат, а текста, то в таком случае отображение будет некорректным [16].

*Пример координат из текстового файла:*

46,065 115,220	-18,400
47,197 115,009	-18,230
52,076 114,428	-18,060
53,294 114,428	-17,890
59,160 114,428	-17,720
...	...

Координаты можно записывать вручную и при необходимости редактировать, даже если файлы уже загружены в систему. Загружаются файлы с рассчитанными и реальными координатами по нажатию кнопки «Загрузить», далее выбирается файл на носителе и координаты отображаются в полях координат.

## 7.3 Программная реализация пользовательского интерфейса модуля анализа траектории и формирования отчетов

В главном окне интерфейса имеется две кнопки «Загрузить», по нажатию которых происходит загрузка файлов рассчитанных и реальных координат, далее производится нажатие на кнопку «Расчет» и в правом поле «Отклонение» отображаются рассчитанные отклонения. Отклонения можно сохранить по нажатию кнопки «Сохранить» [17].

По нажатию кнопки, отклонения сохраняются в формате TXT или EXCEL.

Также после расчета отклонений, нажав на кнопку «Показать график» в левом верхнем углу от панели «Рассчитанные координаты» отобразится график отклонений.

После нажатия кнопки «Показать график», появится окно с графиком отклонений, представленное на рис. 6.

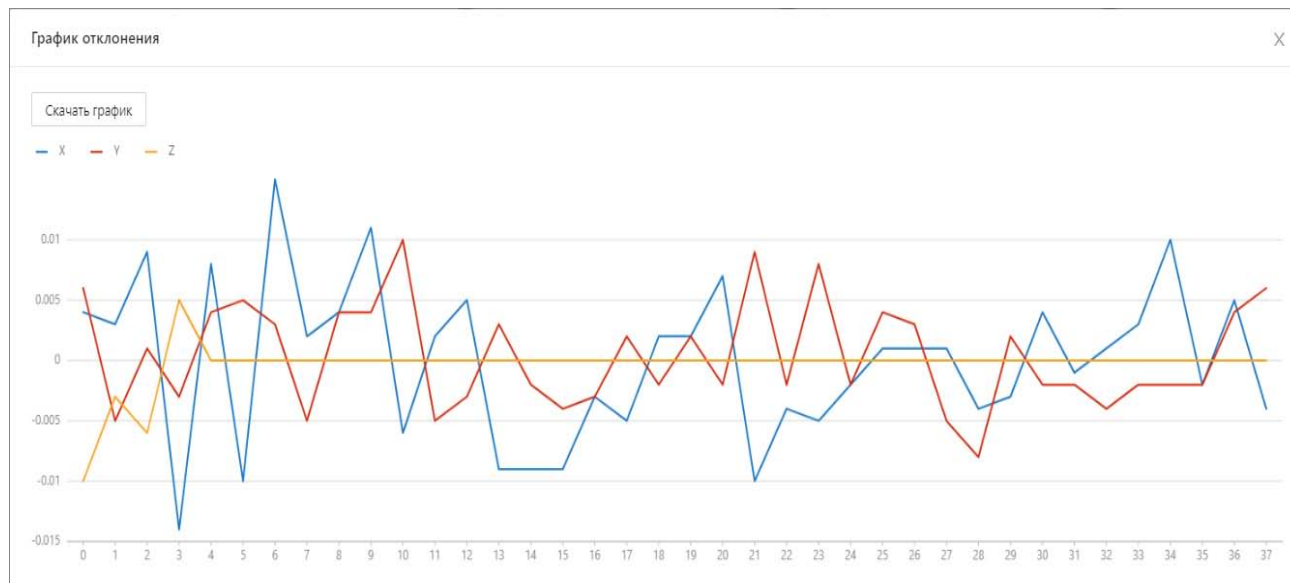


Рис. 6: Окно «График отклонения»

На графике представлены отклонения по 3 осям (X, Y, Z), в автоматическом режиме происходит настройка масштаба под числа отклонений. При наведении на график отображается конкретная точка, ее номер и отклонения по X, Y и Z. Ось слева показывает численные отклонения, ось снизу показывает пронумерованные точки.

Также график можно сохранить, путем нажатия на кнопку «Скачать график», которая находится в окне самого графика отклонений.

Тестирование и отладка модуля анализа траектории режущего инструмента

Для проверки работоспособности модуля, нужно провести тестирование, посредством проведения анализа рассчитанных и реальных координат из файлов \*.txt.

Нажатием на кнопку «Загрузить», загружаем два файла рассчитанных и реальных координат в формате ТХТ, которые появятся в полях координат. После, нажимаем кнопку «Расчет» и программа высчитывает отклонения между рассчитанными и реальными координатами, и также отображает их в поле «Отклонение», работа

представлена на рис. 7. Если нужно, результаты отклонений можно сохранить в формате ТХТ или EXCEL.

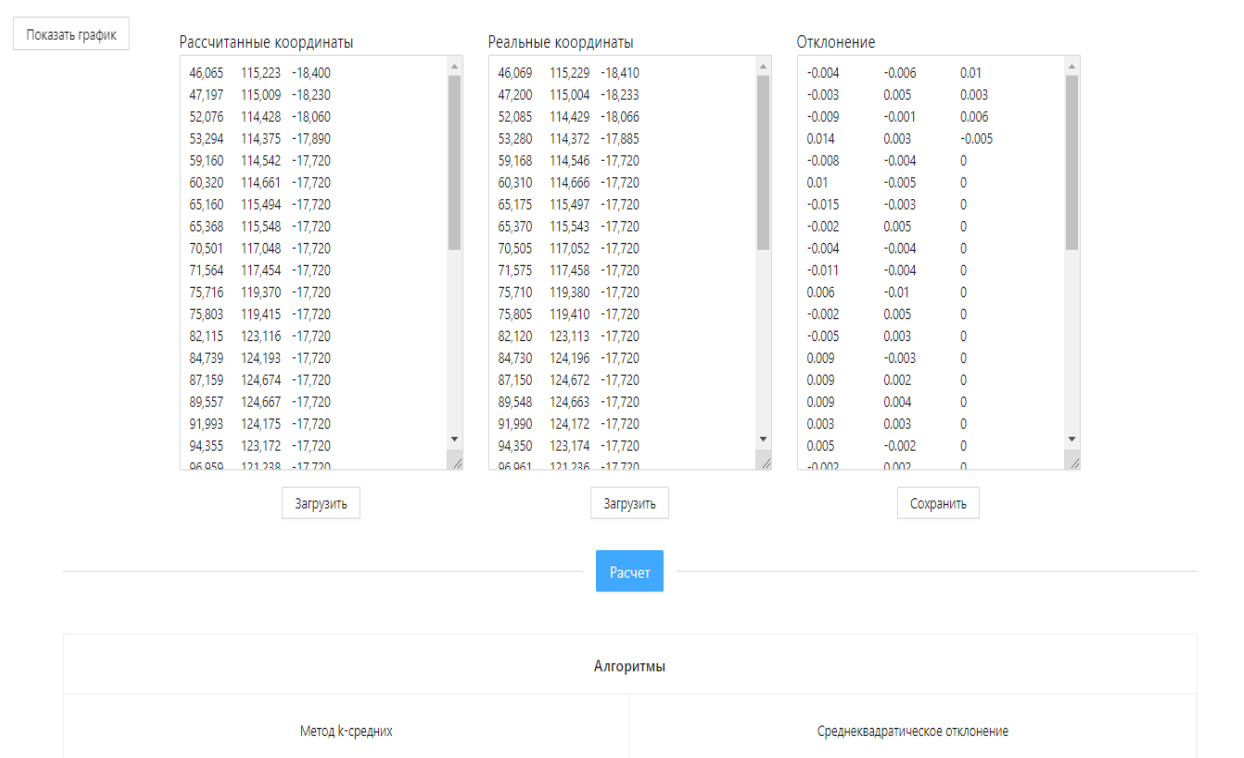


Рис. 7: Работа программы с рассчитанными отклонениями

Далее нажмем на кнопку «Показать график» на рис. 7 и проверим работоспособность отображения графика, продемонстрировано это на рис. 8. Также в окне графика имеется кнопка «Скачать график», для того чтобы проводить анализ в дальнейшем.

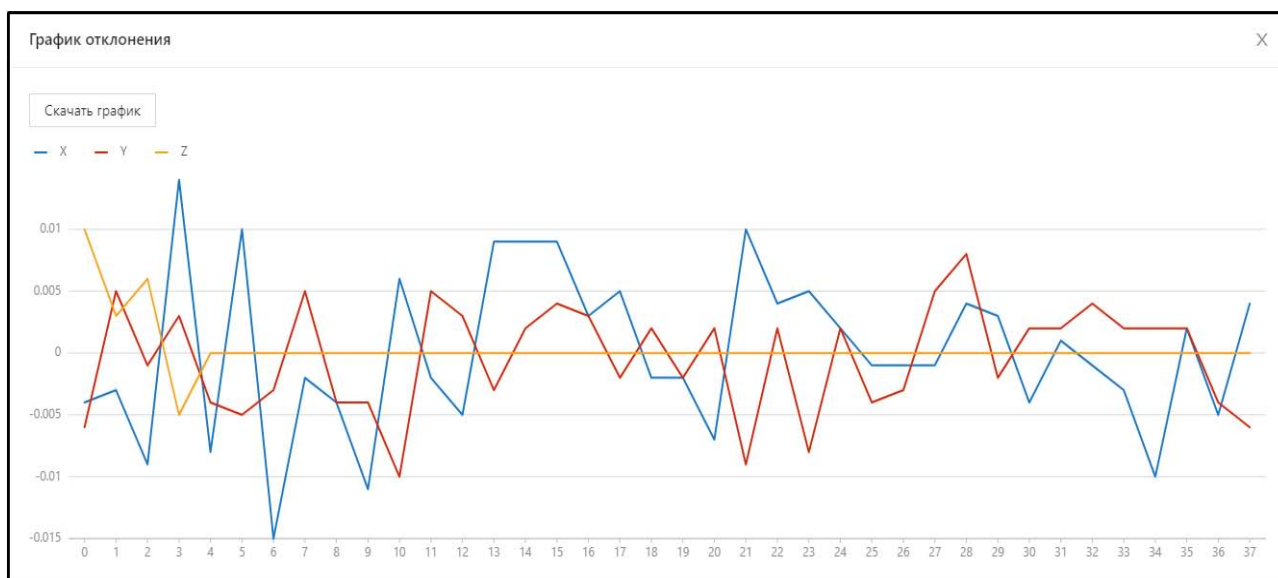


Рис. 8: Отображение графика отклонений после нажатия кнопки «Показать график»

Закроем окно графика нажав кнопку «Закрыть окно» (крестик в правом верхнем углу) представленное на рис. 8.

Программа отобразит окно «Среднеквадратическое отклонение», которое представлено на рис. 9.

Вернувшись на главный экран программы, нажмем кнопку «Среднеквадратическое отклонение» в поле «Алгоритмы».

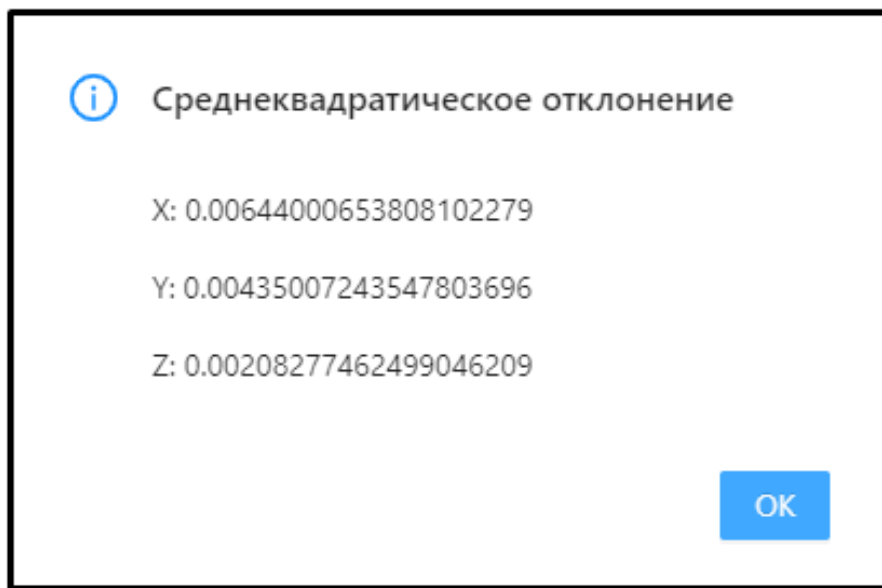


Рис. 9: Вывод алгоритма «Среднеквадратическое отклонение»

Нажимая кнопку «ОК» на рис. 9, окно закроется и будет отображен главный вид программы.

Снова, в поле «Алгоритмы», выбирается «Метод k-средних» и в результате отображается график, показанный на рис. 10.

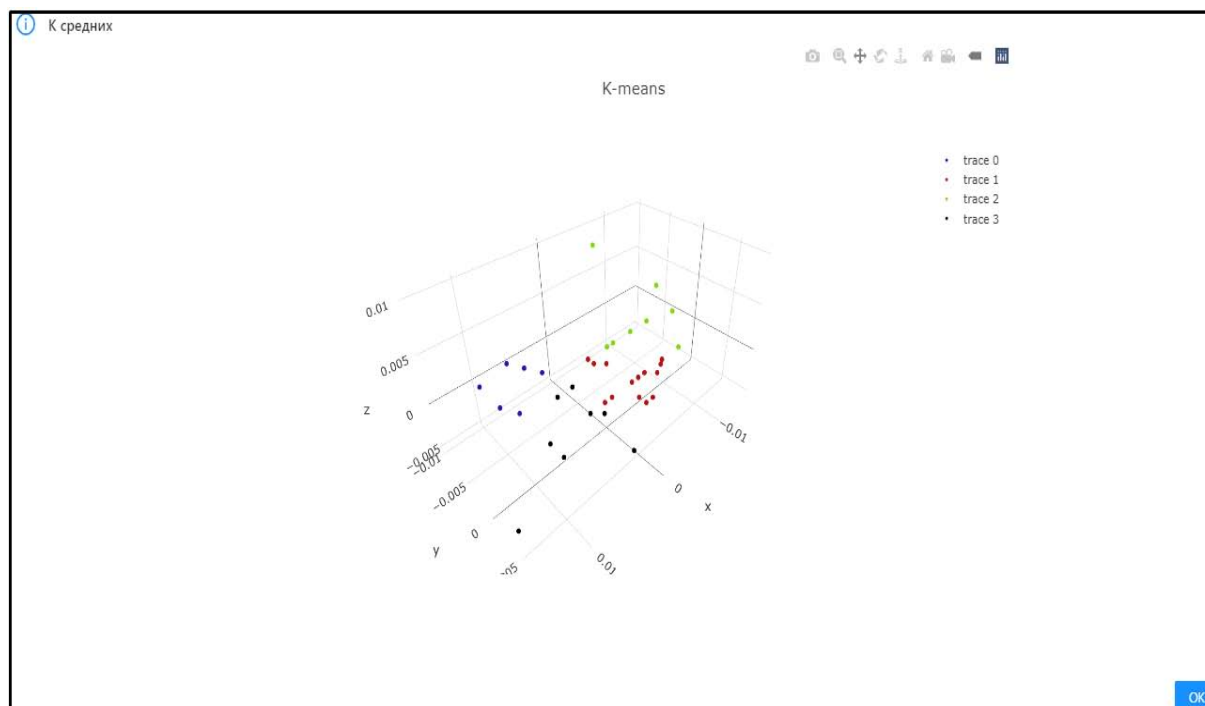


Рис. 10: Результат работы алгоритма «Метод k-средних»

Имеется возможность сохранить график на рисунке 10 в файл \*.png, для дальнейшего анализа.

#### 7.4 Тестирование работы алгоритма метода k-средних

Далее подробно тестируется алгоритм «Метод k-средних», для понимания всех аспектов

работы данного алгоритма и подтверждения правильности его работоспособности.

в программу и считаются отклонения. Выборка представлена на рис. 10.

Выборка реальных и рассчитанных координат будет максимально соответствовать реальным условиям, для этого координаты загружаются

Выбирается алгоритм «Метод k-средних», после отображается график, в котором проводится дальнейший анализ.

Рассчитанные координаты	Реальные координаты	Отклонение
46,065	46,064	0,001
115,223	115,223	0
-18,400	-18,400	0
47,197	47,196	0,001
115,009	115,009	0
-18,230	-18,230	0
52,076	52,075	0,001
114,429	114,429	0
-18,060	-18,060	0
53,294	53,294	0
114,428	114,428	0
-17,890	-17,889	-0,001
59,160	59,160	0
114,428	114,428	0
-17,720	-17,720	0
60,340	60,340	0
114,428	114,428	0
-17,720	-17,720	0
65,161	65,162	-0,001
114,428	114,428	0
-17,720	-17,720	0
65,368	65,368	0
114,428	114,428	0
-17,720	-17,720	0
70,501	70,501	0
114,426	114,428	-0,002
-17,720	-17,720	0
75,368	75,368	0
114,428	114,428	0
-17,720	-17,720	0
85,368	85,368	0
114,428	114,428	0
-17,720	-17,720	0

Рис. 11. Выборка реальных и рассчитанных координат

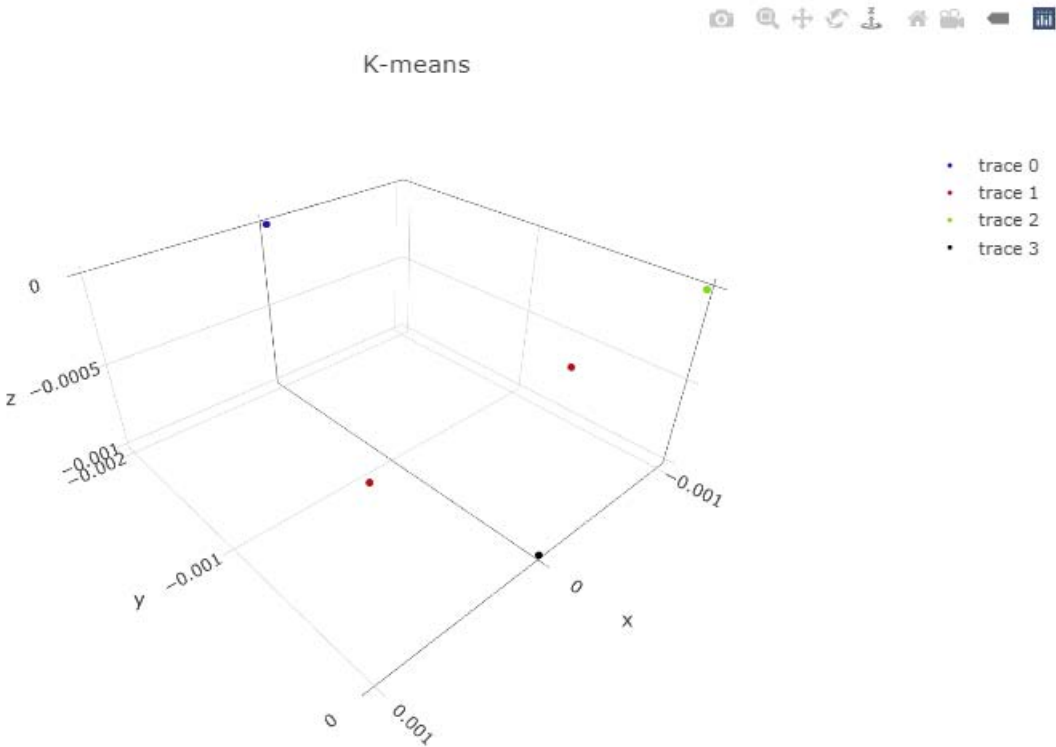


Рис. 12; Результат выполнения алгоритма «Метод k-средних»

В приведенном примере алгоритм «Метод k-средних» выявляет закономерности в кластеризации данных.

отклонениях, путем проведения

Данным алгоритмом было сформировано 4 кластера:

- Trace 0 (максимальное отклонение) «Рис. 13»
- Trace 1 (остаточная группа) «Рис. 14»
- Trace 2 (единственное отрицательное отклонение по X) «Рис. 15»
- Trace 3 (единственное отклонение по Z) «Рис. 16»

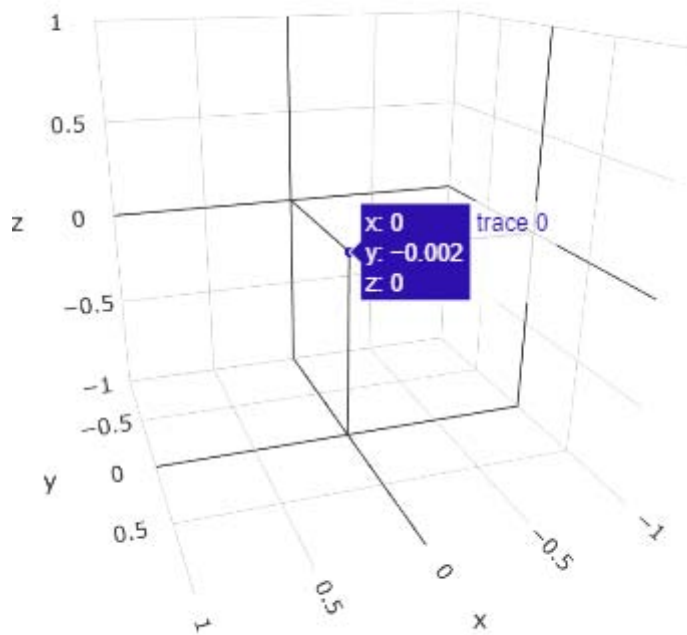


Рис. 13: Точки кластера trace0

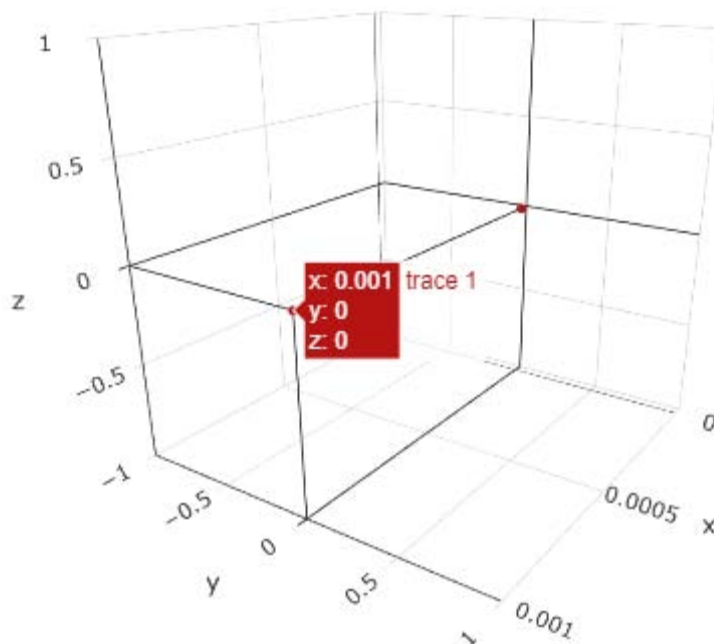


Рис. 14: Точки кластера trace1

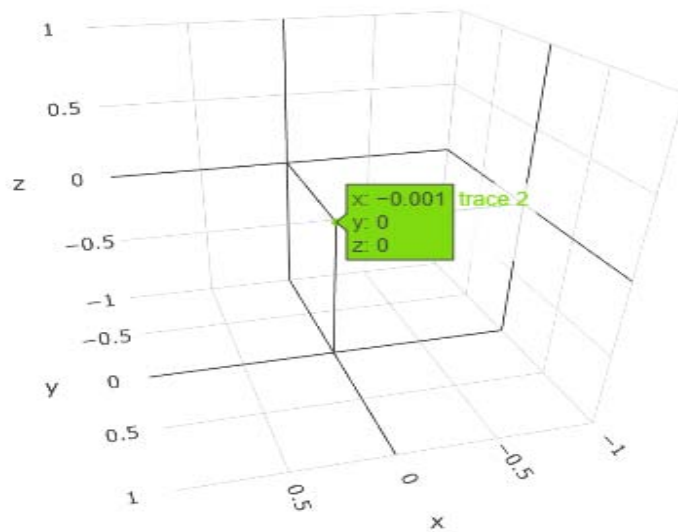


Рис. 15: Точки кластера trace2

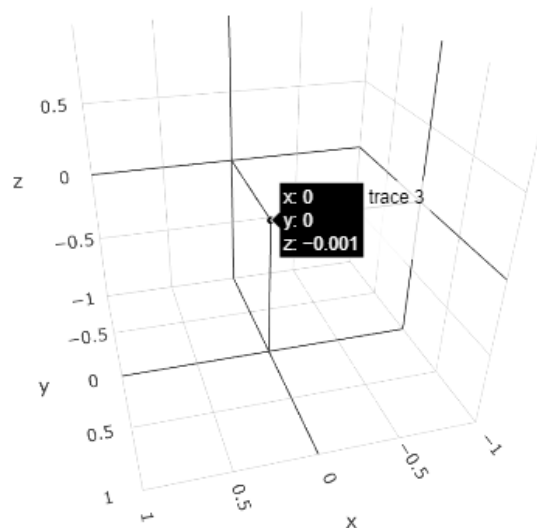


Рис. 16: Точки кластера trace3

«к-средних» — это алгоритм машинного обучения, его работа скрыта от пользователя, не всегда понятно, по каким признакам происходит кластеризация данных. Поэтому результаты работы алгоритма с различными результатами отклонений и их комбинаций, может приводить к тому, что каждый раз разбиение отклонений на группы алгоритмом, будет проводиться по другим общим признакам, которые не похожи на предыдущие.

Можно сделать вывод, что чем ярче выражен общий признак у посчитанных отклонений,

тем легче формируются кластеры. Следовательно, если общие признаки выражено слабо, то алгоритму тяжелее сформировать кластеры (что выявилось в примере, а именно: группа отклонений кластера Трасе1, сформирована обособленной и внутри имеет деление на 2 группы отклонений, которые по своим признакам не смогли сгруппироваться с другими кластерами отклонений, и были сгруппированы друг с другом, поэтому, в результате чего появился 4 кластер), а пользователю сложнее провести оценку полученных данных.

При сверхбольшом количестве входных данных, может потребоваться расширение кластеров, но поставлено ограничение в 4 кластера, как оптимальное.

## VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы было успешно разработано решение для анализа траектории перемещения режущего инструмента в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол». Анализ, проведенный в рамках исследования, показал, что многие существующие системы ЧПУ не реализуют предложенные функциональные возможности, что существенно ограничивает их способность к полноценному анализу процессов обработки. Это открывает новые перспективы для улучшения и оптимизации данных систем.

В процессе работы была создана структурная схема, которая наглядно демонстрирует основные элементы системы и их взаимодействие. Данная схема позволяет визуализировать процесс загрузки файлов в разрабатываемый модуль анализа и описывает внутренние механизмы взаимодействия модулей между собой. Кроме того, она иллюстрирует, как результаты анализа данных выводятся в различные форматы отчетов, включая графики и файлы форматов \*.txt и \*.xls. Это обеспечивает удобство и доступность полученной информации для пользователей.

Также была разработана диаграмма прецедентов, в которой представлены ключевые возможности инструмента для анализа. Эта диаграмма служит важным инструментом для понимания функционала системы и позволяет более эффективно использовать возможности модуля.

Таким образом, результаты данной работы не только подтверждают необходимость внедрения новых функций в системы ЧПУ, но и закладывают основу для дальнейших исследований и разработок в этой области. Реализация предложенных решений позволит значительно повысить эффективность и

точность обработки материалов, что, в свою очередь, будет способствовать улучшению качества продукции и оптимизации производственных процессов. В будущем, дальнейшее развитие модуля анализа может привести к созданию более совершенной и конкурентоспособной системы ЧПУ «АксиОМА Контрол», что откроет новые горизонты для пользователей и производителей в сфере числового программного управления.

*For Citation:* Gusev, S. S. Development of a structural model for constructing a cutting tool trajectory analysis module in the Axiom Control CNC system / S. S. Gusev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 29–39. – DOI

*Для цитирования:* Гусев, С. С. Разработка структурной модели построения модуля анализа траектории режущего инструмента в системе ЧПУ «Аксиома Контрол» / С. С. Гусев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С...–...– DOI

## REFERENCES

1. Meshcheryakova V.B., Starodubov V.S. Metallovezhushchie stanki s ChPU: uchebnoe posobie [CNC metal cutting machines: a tutorial] / – Moskva: INFRA-M, – 2025. – 336 p.
2. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Sistemy chislovogo programmnoy upravleniya: Ucheb. Posobie [Numerical control systems: Textbook] – M. Logos, 2005. – 296 p. EDN: PJARBH.
3. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Programirovanie sistem chislovogo programmnoy upravleniya: Ucheb. Posobie [Programming of numerical control systems: Textbook] – M. Logos, 2008. – 344 p. + kompakt-disk. EDN: PVWTGB.
4. Martinov G.M., Martinova L.I., Pushkov R.L. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii. CHast' – I. CHislovoe programmnoe upravlenie. Uchebnoe posobie

po podgotovke specialistov s vysshim professio-nal'nyim obrazovaniem dlya kadrovogo perevooruzheniya mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii [Automation of technological 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.: MGTU STANKIN. 2010. 203 p.

5. 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.: MGTU «Stankin», 2011. - 200 p.
6. Martinov G.M., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Lyubimov A.B. Specifika postroe-niya panelej upravleniya sistem CHPU po tipu universal'nykh programmno-apparatnykh kom-ponentov [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.
7. Nezhmetdinov R.A., Sokolov S.V., Obuhov A.I., Grigor'ev A.S. Rasshirenie funk-cional'nykh vozmozhnostey sistem CHPU dlya upravleniya mekhano-lazernoj obrabotkoj [Expanding the functionality of CNC systems for controlling mechanical laser processing] // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2011 № 5 pp. 49–53. EDN: OKCCRT.
8. 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. EDN: SMJFWD.
9. 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. EDN: MQFRPT.
10. Abbyasov A.M., Tararykin S.V. Sintez robustnoj sistemy upravleniya transportirovaniem dlinnomernogo materiala na osnove gramiannogo metoda [Synthesis of a robust long-range material transportation control system based on the boundary method] // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. - 2023. - Vyp. 4. – pp. 54-62. EDN: MJGWITH.
11. Borisov O.I., Pyrkina A.A. Novyj metod sinteza algoritmov robustnogo upravleniya po vyhodu [A new method for synthesizing algorithms for robust output control] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2017. T. 17. № 3. pp. 564–567. DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-3-564-567>.
12. Vlasov S.M., Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkina A.A., Bobcov A.A. Robustnaya sistema dinamicheskogo pozicionirovaniya dlya robotizirovannogo maketa nadvodnogo sudna [Robust dynamic positioning system for a robotic surface vessel layout] // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2015. T. 58. № 9. pp. 713–719. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-9-713-719>.
13. Tempel' Yu.A., Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu. Povyshenie tochnosti obrabotki na stankah s chislovym programmnyim upravleniem na osnove komp'yuternogo modelirovaniya deformacij tryohmernoj modeli detali [Improving the accuracy of machining on numerically controlled machines based on computer simulation of deformations of a three-dimensional model of a part] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii – 2021. № 2. – pp. 76-80. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.38497>.
14. Grushin D.E., Legaev V.P. Postroenie modeli algoritma upravleniya processom rezan'ya obrabotki na stankah s ChPU [Building a model of an algorithm for controlling the cutting and machining process on CNC machines] // Universum: tekhnicheskie nauki:

elektron. nauchn. zhurn. – 2023. – 3(108). – pp. 53-54. EDN: ZGBVWN.

15. Gusev S.S., Makarov V.V. Analiz sistem avtomaticheskogo proektirovaniya [Analysis of automatic design systems] // Izvestiya MGUTU «MAMI». 2024. T. 18, №1. pp. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624783>.
16. Gusev S.S., Makarov V.V. Analiz sushchestvuyushchih sredstv vizualizatsii traektorii rezhushchego instrumenta v sistemah CHPU [Analysis of existing tools for visualizing the trajectory of a cutting tool in CNC systems] // Izvestiya MGUTU «MAMI». 2024. T. 18, №2. pp. 157-167. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624784>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мещерякова В.Б., Стародубов В.С. Металлорежущие станки с ЧПУ: учебное пособие / — Москва: ИНФРА-М, — 2025. — 336 с.
2. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления: Учеб. пособие. — М. Логос, 2005. — 296 с. EDN: PJARBH.
3. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Программирование систем числового программного управления: Учеб. пособие. — М. Логос, 2008. — 344 с. + компакт-диск. EDN: PVWTGB.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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. EDN: OKCCRT.
8. 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. EDN: SMJFWD.
9. 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. EDN: MQFRPT.
10. Аббясов А.М., Тарарыкин С.В. Синтез робастной системы управления транспортированием длинномерного материала на основе грамианного метода // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2023. - Вып. 4. - С. 54-62. EDN: MJGWTN.
11. Борисов О.И., Пыркин А.А. Новый метод синтеза алгоритмов робастного управления по выходу // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 564–567. DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-3-564-567>.
12. Власов С.М., Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А., Бобцов А.А. Робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 713–719. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-9-713-719>.
13. Темпель Ю.А., Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю. Повышение точности обработки на станках с числовым программным

управлением на основе компьютерного моделирования деформаций трёхмерной модели детали // Современные наукоемкие технологии. – 2021. № 2. – С. 76-80. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.38497>.

14. Грушин Д.Е., Легаев В.П. Построение модели алгоритма управления процессом резанья обработки на станках с ЧПУ // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2023. – 3(108). – С. 53-54. EDN: ZGBVWN.
15. Гусев С.С., Макаров В.В. Анализ систем автоматического проектирования // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, №1. С. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624783>.
16. 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>.
17. Гусев С.С., Макаров В.В. Разработка постпроцессоров для ЧПУ «АксиОМА Контроль» // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 3. С. 169–179. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624786>.