СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc206701255)

[1 Аналитическая часть 5](#_Toc206701256)

[1.1 Анализ процесса электроэрозионной обработки 5](#_Toc206701257)

[1.1.1 Электроэрозионная обработка 5](#_Toc206701258)

[1.1.2 Этапы процесса электроэрозионной обработки 6](#_Toc206701259)

[1.3.1 Компоненты электроэрозионного станка 7](#_Toc206701260)

[1.4.1 Виды электроэрозионной обработки 7](#_Toc206701261)

[1.2 Параметры, учитываемые в имитационных моделях 9](#_Toc206701262)

[1.2.1 Характеристики электрического импульса 9](#_Toc206701263)

[1.2.2 Свойства материалов и электродов заготовок 10](#_Toc206701264)

[1.2.3 Параметры диэлектрической жидкости 10](#_Toc206701265)

[1.3 Анализ функциональных требований 11](#_Toc206701266)

[1.4 Обзор существующих симуляторов станка 13](#_Toc206701267)

[1.5 Проблемы и ограничения 14](#_Toc206701268)

[1.6 Методы моделирования 15](#_Toc206701269)

[1.6.1 Классификация подходов 15](#_Toc206701270)

[1.6.2 Моделирование мeста разряда 16](#_Toc206701271)

[1.6.3 Моделирование физики искрового разряда 17](#_Toc206701272)

[1.6.4 Моделирование тепловых процессов 17](#_Toc206701273)

[1.6.5 Моделирование формирования результирующей поверхности детали 18](#_Toc206701274)

[1.6.6. Моделирование гидродинамики диэлектрика и удаления продуктов эрозии 18](#_Toc206701275)

[1.6.7 Моделирование износа электрода-инструмента 19](#_Toc206701276)

[1.6.8 Модели позволяющие напрямую узнать объем удаленного материала 19](#_Toc206701277)

[2 Теоретическая часть 20](#_Toc206701278)

[2.1 Создание 3D модели электроэрозионного станка 20](#_Toc206701279)

[2.2 Моделирование движения станка 21](#_Toc206701280)

[2.3 Интерпретация gcode для управления станком 23](#_Toc206701281)

[2.4 Модель удаления материала 25](#_Toc206701282)

[2.5 Алгоритм расчета 27](#_Toc206701283)

[3 Экспериментальная часть 30](#_Toc206701284)

[3.1 Реализация прототипа 30](#_Toc206701285)

[3.2 Описание эксперимента 30](#_Toc206701286)

[3.3 Результаты эксперимента 30](#_Toc206701287)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 31](#_Toc206701288)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 32](#_Toc206701289)

# ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка представляет собой сложный физико-технический процесс, при котором съем материала осуществляется за счет электрической эрозии, возникающей в результате импульсных разрядов между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. Данный метод позволяет получать отверстия диаметром от нескольких микрометров до нескольких миллиметров с высокой точностью и качеством поверхности.

Несмотря на широкое практическое применение, процесс электроэрозионной обработки встречается с множеством препятствий как при его исследовании, так и при изучении молодыми специалистами. Главными препятствиями является дороговизна оборудования и сложность отслеживания необходимых для исследования параметров.

**Актуальность** данной работы обусловлена необходимостью валидации работы разработанных моделей.

**Целью** работы является разработка прототипа симулятора электроэрозионного станка для тестирования работы моделей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие подходы к моделированию процесса электроэрозионной обработки;
2. Разработать необходимые модели процесса электроэрозионной обработки;
3. Создать программное обеспечение для тестирования разработанных моделей;
4. Провести экспериментальные исследования для проверки адекватности моделей.

# 1 Аналитическая часть

## 1.1 Анализ процесса электроэрозионной обработки

### 1.1.1 Электроэрозионная обработка

Электроэрозионная обработка представляет собой бесконтактную технологию производства, которая обеспечивает удаление материала с электропроводящей заготовки посредством последовательности быстрых электрических разрядов, обычно называемых искрами.

Заготовка и электрод инструмент находятся в диэлектрической жидкости под напряжением на некотором расстоянии друг от друга. Это расстояние называется межэлектродным промежутком. Диэлектрическая жидкость, в данном случае, служит для стабилизации процесса эрозионного разрушения.

Разрушение материала заготовки происходит множественными электрическими импульсами, возникающими между электродом и заготовкой в межэлектродном промежутке. Напряжение на электроды подается от источника питания.

Электрическая энергия превращается в теплоту, которая приводит к нагреву как заготовки, так и электрода. Таким образом под воздействием высоких температур материал заготовки и электрода начинает плавиться, а затем испарятся.

После окончания электрического импульса плазменный канал схлопывается, что приводит к быстрому охлаждению и затвердеванию части расплавленного и испаренного материала. Быстрое расширение испаренного материала создает микровзрывы в искровом промежутке, выбрасывая расплавленный материал в диэлектрическую жидкость в виде осколков. Затем диэлектрическая жидкость играет решающую роль в смыве этих осколков и охлаждении промежутка, восстанавливая изоляцию между электродами.

В результате множественных разрядов на заготовке появляются перекрывающие друг друга лунки, благодаря которым происходит формирование желаемой формы заготовки.

Электроэрозионная обработка является одним из эффективных методов обработки труднообрабатываемых материалов. Особенность данного метода заключается в способности резать твердый материал без физического контакта между инструментом и заготовкой, где удаление материала происходит за счет искровой эрозии.

### 1.1.2 Этапы процесса электроэрозионной обработки

В процессе электроэрозионной обработки можно выделить несколько следующих друг за другом этапов выделение и рассмотрение которых может помочь в дальнейшем, при проектировании симулятора:

* подготовка оборудования и материалов;
* формирование межэлектродного зазора;
* генерация электрических импульсов;
* удаление продуктов эрозии;
* завершение обработки;
* анализ полученного результата.

Для повышения эффективности процесса электроэрозионной обработки, следует выбрать наиболее подходящий электрод-инструмент [2], а также подобрать параметры оборудования такие как: сила тока, напряжение, частота импульсов и межэлектродный зазор [3]. От выбранных параметров зависит качество обработки.

Далее, между электродом и заготовкой создается небольшой зазор, заполненный диэлектрической жидкостью. Этот зазор играет важную роль в стабильности процесса [3].

На данном этапе начинается обработка заготовки. Электрические импульсы высокой энергии создают локальные разряды, которые вызывают эрозию материала заготовки. В результате происходит удаление микроскопических частиц материала.

Продукты эрозии, такие как металлические частицы и газы, удаляются из зоны обработки с помощью диэлектрической жидкости.

После достижения заданной формы или размеров обработка прекращается, а заготовка очищается от остатков диэлектрической жидкости и продуктов эрозии.

После окончания обработки следует оценить качество поверхности обработанной заготовки, точность размеров и соответствие техническим требованиям.

### 1.3.1 Компоненты электроэрозионного станка

Электроэрозионный станок представляет собой сложную систему, состоящую из множества связанных между собой компонентов. Обзор данной структуры может быть полезен при проектировании компонентов будущего симулятора. Основные компоненты станка включают в себя:

* генератор импульсов является главным элементом в электроэрозионном станке. Он формирует последовательность электрических импульсов, подчиняющуюся заданным параметрам обработки;
* электрод формирует необходимую геометрию обрабатываемой поверхности. Может отличаться формой в зависимости от типа электроэрозионной обработки и требуемой формы заготовки;
* механическая система обеспечивает точное позиционирование электрода и заготовки;
* система ЧПУ управляет перемещением рабочих органов станка в соответствии с заданной программой. Также контролирует работу всех остальных компонентов.

### 1.4.1 Виды электроэрозионной обработки

Также, электроэрозионную обработку делят на несколько типов. Каждый из которых предназначен для решения конкретных задач [5]:

* + электроэрозионная обработка штамповкой – чаще всего использует фасонный электрод, часто являющийся негативной копией желаемой полости, для создания соответствующего отпечатка в заготовке [4];
  + проволочная эрозия – в этом процессе тонкая, непрерывно движущаяся проволока служит электродом для вырезания сложных двумерных форм в заготовке, как при работе с ленточной пилой [4];
  + эрозия малых отверстий – специально разработана для сверления небольших и глубоких отверстий в проводящих материалах, эта технология использует трубчатые электроды, через которые диэлектрическая жидкость часто подается в зону обработки [4].

Использование наиболее подходящего под ту или иную задачу типа обработки позволит добиться наилучшего результата.

## 1.2 Параметры, учитываемые в имитационных моделях

### 1.2.1 Характеристики электрического импульса

Главной категорией параметров, наиболее сильно влияющих на процесс и результат обработки, являются характеристики импульса электрического тока. Данные параметры определяют энергию, выделяемую в каждом разряде, что существенно влияет на удаление материала, износ инструмента и качество обработки поверхности.

К ключевым параметрам данной категории относится пиковый ток (Ip), он оказывает значительное влияние на скорость съема материала (MRR), износа электрода (EWR) и шероховатость поверхности (Ra). Более высокие пиковые токи обычно приводят увеличению энергии импульса, что приводит к повышению скорости удаления материала с заготовки материала, но также к более высокому износу электродов и повышенной шероховатости обрабатываемой поверхности [6].

Время включения импульса (Ton) — представляет собой продолжительность подачи электрического разряда и является еще одним важным параметром. Более короткое время включения может потенциально повысить эффективность электрического разряда и привести к увеличению скорости удаления материала (MRR), в то время как чрезмерно длительное время включения может привести к нежелательному расширению плазменного канала, снижению эффективности и увеличению расслоения расплавленного материала. Данный параметр также оказывает заметное влияние на износ электродов и шероховатость поверхности заготовки [6].

Время отключения импульса (Toff)— представляет собой промежуток времени между последовательными электрическими разрядами. Увеличение данного параметра позволяет плазменному каналу сузиться и уменьшить воздействие импульса на поверхность заготовки, что может привести к снижению скорости удаления материала (MRR). Этот параметр также играет значительную роль в износе электродов и шероховатости поверхности [6].

Кроме того, длительность разряда и эффективная частота разряда являются важными аспектами импульса тока, которые учитываются при моделировании процесса электроэрозионной обработки [7]. Напряжение (V), подаваемое между электродами, также является важным параметром, влияющим на данный рассматриваемый процесс [6].

### 1.2.2 Свойства материалов и электродов заготовок

Внутренние свойства материалов, использованных для изготовления электрода и заготовки, имеют значение для определения их реакции на интенсивные тепловое воздействие.

Теплопроводность влияет на эффективность распространения тепла внутри материалов [6], а удельная теплоемкость определяет количество необходимой энергии, которое следует сообщить заготовке для повышения температуры обрабатываемого материала [6].

Температура плавления характеризует точку, при которой материал начинает переходить из твердого состояния в жидкое [6]. Показатели теплоты плавления и испарения представляют собой энергию, поглощенную или высвобожденную во время этих фазовых переходов, и их учет крайне важен для точного моделирования механизма удаления материала [6].

Электрическое сопротивление влияет на выделение тепла при прохождении электрического тока через материалы [6].

### 1.2.3 Параметры диэлектрической жидкости

Диэлектрическая жидкость в электроэрозионной обработке выполняет множество важнейших функций, а ее параметры существенно влияют на процесс.

Ее изоляционные свойства необходимы для предотвращения преждевременного электрического разряда между электродами [8]. Ионизация диэлектрической жидкости является важным этапом в формировании плазменного канала, необходимого для протекания тока и последующего удаления материала [8].

Промывочная способность диэлектрической жидкости используется для эффективного удаления остатков, образующихся в процессе работы, и для охлаждения обрабатываемой зоны, обеспечивая тем самым стабильность процесса и предотвращая повторное отложение удаленного материала [8]. Тип используемой диэлектрической жидкости (например, масло, деионизированная вода, газ) может существенно влиять на характеристики разряда и процесс удаления материала [6].

Циркуляция и скорость потока диэлектрической жидкости также являются важными параметрами, влияющими на эффективность удаления мусора и охлаждения [9]. Кроме того, электрические свойства диэлектрической жидкости в межэлектродном объеме могут изменяться со временем из-за накопления мусора, что может повлиять на стабильность и характеристики электрических разрядов.

## 1.3 Анализ функциональных требований

Основная цель создания симулятора — предоставить пользователю возможность исследовать и анализировать процесс электроэрозионной обработки, не прибегая к дорогостоящим физическим экспериментам. Симулятор должен позволить моделировать различные параметры обработки, визуализировать результаты и оптимизировать технологические режимы.

Симулятор должен моделировать процесс удаления материала с заготовки под воздействием электрических разрядов. Пользователь, в свою очередь, сможет задавать различные параметры обработки. Моделирование будет происходить в реальном времени или с ускорением, в зависимости от выбранных параметров и вычислительных ресурсов.

Симулятор предоставит возможность визуализировать процесс обработки в трехмерном пространстве. Пользователь сможет наблюдать за изменением формы заготовки, образованием лунок и кратеров, а также за распределением температуры в материале.

Визуализация будет включать в себя:

* отображение заготовки и электрода-инструмента;
* динамику удаления материала и формирования поверхности.

Симулятор позволит анализировать результаты обработки, включая:

* количество удаленного материала;
* форму и размеры полученных отверстий;

Пользователь может получать графики и таблицы, отражающие изменение параметров обработки во времени.

Симулятор предоставит возможность изменять параметры обработки (напряжение, ток, длительность импульсов и пауз) и анализировать их влияние на процесс обработки. Это позволит пользователю находить оптимальные режимы обработки для достижения желаемых результатов.

Пользователь сможет проводить виртуальные эксперименты, изменяя параметры и наблюдая за их влиянием на производительность.

Симулятор будет учитывать износ электрода-инструмента в процессе обработки. Пользователь сможет наблюдать за изменением формы электрода и его влиянием на процесс обработки. Это позволит прогнозировать срок службы инструмента и планировать его замену.

Пользователь сможет сохранять параметры обработки и результаты моделирования для последующего анализа или повторного использования. Симулятор должен поддерживает загрузку ранее сохраненных сценариев, что позволяет сравнивать результаты различных экспериментов.

Симулятор предоставит возможность интерактивного управления процессом обработки. Пользователь может останавливать, приостанавливать и возобновлять процесс, а также изменять параметры в реальном времени. Это позволяет более гибко исследовать процесс и вносить коррективы в ходе моделирования.

Симулятор будет поддерживать моделирование обработки различных материалов, таких как сталь, медь, алюминий и другие. Пользователь сможет задавать физические свойства материала (плотность, теплопроводность, удельную теплоемкость, температуру испарения) для более точного моделирования.

## 1.4 Обзор существующих симуляторов станка

Наиболее распространенными симуляторами являются пакеты программного обеспечения CAM (система автоматизации технологической подготовки производства), которые включают функции симуляции для проверки траекторий обработки перед фактическим использованием станка.

Основные примеры симуляторов:

* bobCAD-CAM's Wire EDM CAD-CAM software: Это программное обеспечение предоставляет полный набор инструментов для проектирования и программирования проволочных ЭЭС. Оно включает функции симуляции для проверки траекторий обработки, что позволяет пользователям моделировать процесс и генерировать код G для станков, таких как Mitsubishi, Japax и другие [10];
* gibbsCAM: Это CAM-программное обеспечение предлагает симуляцию работы ЭЭС, позволяя пользователям проверять программы перед фактической обработкой. Оно подходит для различных типов станков, включая фрезерные, токарные и ЭЭС [11];
* CAMWorks' Wire EDM CAM software: Это программное обеспечение включает виртуальную симуляцию проволочных ЭЭС, что помогает автоматизировать программирование и проверять траектории обработки для 2- и 4-осевых станков [12];
* программное обеспечение Mitsubishi Electric для прошивных ЭЭС: Оно включает функции симуляции для измерений на станке и проверки процессов, что делает его полезным для пользователей прошивных ЭЭС [13].

Эти инструменты в основном предназначены для профессионалов в области программирования и производства, специализированные тренажеры для обучения операторов ЭЭС, не были обнаружены в открытом доступе.

Таким образом, существующие симуляторы электроэрозионных станков в основном представлены CAM-программным обеспечением с функциями симуляции для проверки траекторий обработки.

## 1.5 Проблемы и ограничения

Моделирование электроэрозионной обработки связанно со значительными трудностями. Данный процесс является мультифизическим. В нем одновременно протекают и взаимодействуют тепловые, электрические, гидродинамические и плазменные явления [14].

Также, процессу присуща стохастичность: местоположение, время возникновения и энергия каждого отдельного разряда подвержены случайным флуктуациям [15]. Что, в свою очередь, затрудняет точное предсказание формы и размера единичных кратеров, а также их взаимного влияния при формировании поверхности.

Наконец, прямое наблюдение и измерение физических явлений в межэлектродном зазоре, который имеет микронные размеры и заполнен диэлектриком, чрезвычайно затруднено, что усложняет валидацию моделей [6].

Помимо проблем, связанных с сложностью процесса, дополнительные ограничения накладывает необходимость достижения работы симулятора в реальном времени.

Таким образом, достижение 100% точности практически невозможно и основной задачей является нахождение модели, которая могла бы при относительно низкой ресурсоемкости прогнозировать процесс с достаточно высокой точностью.

## 1.6 **Методы моделирования**

Моделирование физических явлений, происходящих во время электроэрозионной обработки, является предметом многочисленных исследований. Точность этих моделей напрямую влияет на возможность прогнозирования выходных характеристик процесса, таких как скорость съема материала, износ инструмента и качество обработанной поверхности.

### 1.6.1 Классификация подходов

Многообразие физических явлений и целей моделирования привело к разработке различных подходов и методов для описания процесса ЭЭО. Их можно классифицировать по нескольким признакам.

Физические модели стремятся описать процесс ЭЭО на основе фундаментальных законов физики, таких как законы сохранения массы, импульса и энергии, уравнения теплопроводности, электродинамики, гидродинамики и физики плазмы [6]. Целью является понимание физических механизмов, лежащих в основе процесса, и предсказание его характеристик на основе этих механизмов.

Эмпирические модели,в отличие от физических, эти модели не ставят целью детальное описание механизмов процесса, а фокусируются на установлении математических зависимостей между входными параметрами (режимы обработки, свойства материалов) и выходными характеристиками (MRR, TWR, Ra и т.д.) на основе анализа экспериментальных данных [16].

Моделирование ЭЭО можно также разделить по масштабу рассматриваемого явления на модели единичного разряда и модели множественных разрядов.

Модели единичного разрядадетально анализируют физические процессы, происходящие во время одного изолированного электрического разряда [6]. Основное внимание уделяется формированию единичного кратера эрозии, поскольку его геометрия и объем определяют и влияют на последующую шероховатость поверхности [16].

Модели множественных разрядов, в свою очередь, направлены на описание реального процесса ЭЭО, который является результатом последовательного воздействия большого числа разрядов [6]. Они учитывают факторы, нерелевантные для одиночного разряда, такие как стохастическое распределение разрядов по поверхности, перекрытие кратеров, накопление и влияние продуктов эрозии и газовых пузырей в МЭП, динамика изменения зазора из-за съема материала и износа ЭИ. Обобщенная модель процесса электроэрозионной обработки показанная на рисунке 1.

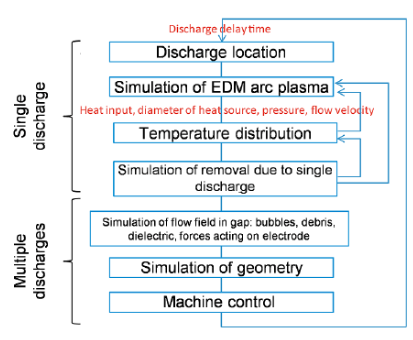


Рисунок 1 – Обобщенная модель процесса электроэрозионной обработки

### 1.6.2 Моделирование мeста разряда

Обычно разряд происходит в точках наименьшего расстояния между электродами. Однако, его месторасположение может изменяться при наличии в межэлектродном зазоре мусора или примесей [17]. Исходя из этого можно заключить, что данный процесс является стохастическим.

Учитывая стохастическую природу, многие модели используют вероятностные подходы для определения места разряда.

Первым походом является время задержки зажигания. В котором время между подачей импульса напряжения и фактическим началом протекания тока (пробоем) является случайной величиной, зависящей от локальных условий в МЭП (зазор, наличие шлама, пузырей) [6]. Модели могут предполагать, что разряд происходит в той точке МЭП, где случайное значение td​ оказывается минимальным в данный момент времени. Распределение td​ часто аппроксимируется экспоненциальным или другими статистическими законами, параметры которых зависят от ширины зазора и других факторов [6].

Также используется статистическое моделирование, в которомместо разряда может определяться путем генерации случайных координат на обрабатываемой поверхности в соответствии с определенным законом распределения вероятности. Это распределение может быть равномерным (простейший случай) или учитывать влияние геометрии зазора, концентрации шлама и т.д. [18].

### 1.6.3 Моделирование физики искрового разряда

Наиболее распространенный подход для связи физики разряда с последующим тепловым анализом электродов заключается в использовании Гауссова распределения теплового потока [19]. Плазменный канал в этом случае рассматривается неявно, как источник тепла, приложенный к поверхности электрода.

### 1.6.4 Моделирование тепловых процессов

Тепловые процессы определяют основной механизм удаления материала в ЭЭО – плавление и испарение. Моделирование этих процессов позволяет прогнозировать форму и размер единичного кратера [19].

 Доминирующим методом является МКЭ, c помощью которого решается нестационарное уравнение теплопроводности в объеме электрода (обычно заготовки).

Моделирование удаления материала происходит различными способами. Одним из наиболее простых методов является удаление элементов из сетки при достижении ими температуры плавления или испарения.

Другим способом является моделирование по изотерме плавления, в котором граница кратера определяется изотермой, соответствующей температуре плавления материала в конце импульса или после некоторого времени.

### 1.6.5 Моделирование формирования результирующей поверхности детали

Обработанная поверхность в ЭЭО представляет собой сложный рельеф, сформированный наложением множества единичных кратеров.Моделирование этой топографии важно для прогнозирования шероховатости поверхности и визуализации результата обработки.

Форма и размер единичного кратера являются базовыми элементами для построения модели поверхности. Они зависят от энергии разряда и свойств материала, и могут быть получены из тепловых моделей, которые описаны в разделе 1.6.4 или экспериментально.

Теоретически, МКЭ может моделировать последовательные разряды и формирование результирующей поверхности [19]. Однако, это требует огромных вычислительных ресурсов из-за необходимости многократного решения задачи с изменяющейся геометрией и случайным положением разрядов.

В случае моделей, где важен скорее порядок величины объема или основной тепловой эффект, а не точная геометрия поверхности, допустимо упрощение формы единичного кратера до полусферы [20].

### 1.6.6. Моделирование гидродинамики диэлектрика и удаления продуктов эрозии

Для моделирования гидродинамики чаще всего используются метод вычислительной гидродинамики (Computational fluid dynamics) [6]. Многофазные CFD симуляции с отслеживанием частиц являются очень ресурсоемкими. Для расчетов данных симуляций используется специализированное ПО: ANSYS Fluent, Star-CD, COMSOL.

### 1.6.7 Моделирование износа электрода-инструмента

Износ электрода-инструмента является неизбежным сопутствующим явлением ЭЭО, которое напрямую влияет на точность формы и размеров обрабатываемой детали. Моделирование износа электрода необходимо для прогнозирования и компенсации этого износа.

Износ ЭИ, так же, как и удаление материала с заготовки, происходит за счет плавления и испарения под действием тепла от плазменного канала [14]. Поэтому тепловые модели МКЭ, описанные в разделе 1.6.4, могут быть применены и для расчета износа ЭИ.

Из-за сложности точного физического моделирования, TWR часто прогнозируют с помощью эмпирических моделей, построенных на основе экспериментальных данных. Используются методы регрессии, RSM, ANN для установления зависимости TWR от электрических параметров (Ip​,Ton​,Toff​,Vg​), материала ЭИ, диэлектрика и т.д [21].

### 1.6.8 Модели позволяющие напрямую узнать объем удаленного материала

Также были обнаружены модели, позволяющие определить объем удаленного единичным разрядом материала. Например, модель, основанная на энергетическом балансе.

Целью модели является оценка объема материала, удаляемого с поверхности электрода (как детали, так и инструмента, но фокус в статье все же отдан детали) в результате одного импульса. Данная модель учитывает, что общая энергия разряда распределяется на нагрев, плавление и испарение материала, а также на различные потери [22].

Достоверность разработанной модели авторы подтверждают экспериментальными исследованиями эрозии стали C45 и тяжелого вольфрамового сплава (WSC) при одиночных разрядах [22].

# 2 Теоретическая часть

## 2.1 Создание 3D модели электроэрозионного станка

Для создания цифрового двойника электроэрозионного станка была разработана его трехмерная модель. Процесс моделирования основывался на серии фотографий реального объекта (пример на Рис. 2), что обеспечило высокую степень соответствия модели оригиналу.



Рисунок 2 – Фото моделируемого станка

Моделирование выполнялось в программной среде Blender, которая была выбрана за ее широкие функциональные возможности. Итоговая модель (Рис. 3) точно воспроизводит геометрию и кинематическую схему шестиосевого манипулятора станка и полностью готова для экспорта в форматы, необходимые для дальнейшего использования в симуляциях и расчетах.

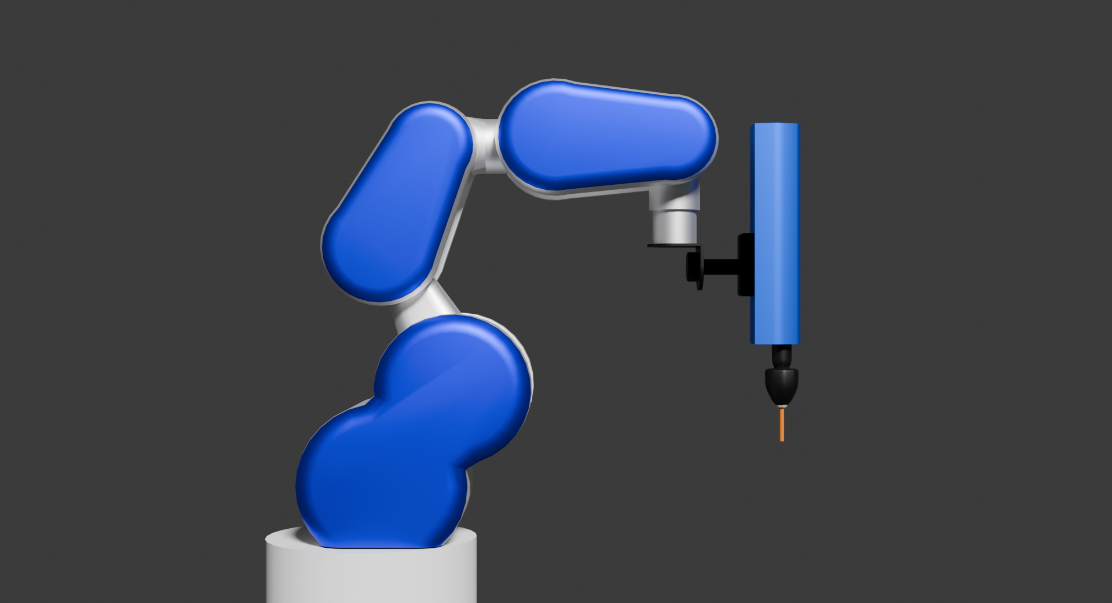


Рисунок 3 – Рендер трехмерной модели

## 2.2 Моделирование движения станка

Для точного управления движением промышленных роботов-манипуляторов и станков с ЧПУ (числовым программным управлением) ключевой задачей является моделирование их кинематики. Этот процесс позволяет точно позиционировать рабочий инструмент станка в пространстве. В основе этого моделирования лежат два взаимосвязанных понятия: прямая и обратная кинематика.

Прежде чем управлять движением, необходимо создать точную цифровую модель станка. Эта модель, часто называемая "скелетом", представляет собой упрощенную структуру, состоящую из звеньев (частей манипулятора) и суставов (подвижных соединений).

Для описания этой модели в робототехнике широко используется формат URDF (Unified Robot Description Format). Это XML-файл, который содержит всю ключевую информацию о геометрии станка:

* Для звений описываются их размеры, масса, инерционные характеристики и визуальное представление.
* Для суставов определяются их типы (вращательные, поступательные), оси движения и допустимые пределы (например, максимальный и минимальный угол поворота).

Файл URDF, по сути, является "паспортом" робота, который позволяет программам для моделирования и симуляции (например, ROS, Gazebo) точно понимать его физическую структуру. Имея точное описание станка можно приступать к моделированию его движений.

Прямая кинематика решает простую задачу: если известны углы поворота каждого сустава, то, где будет находиться рабочий инструмент (например, фреза или захват)? Это прямой расчет "от суставов к инструменту".

Обратная кинематика, в свою очередь, решает гораздо более сложную и практически важную задачу: для того, чтобы рабочий инструмент оказался в заданной точке пространства с нужной ориентацией, какие углы должен принять каждый из сервоприводов в суставах?

Именно решение задачи обратной кинематики позволяет системе управления станка переводить команды из формата "переместить инструмент в координату (X, Y, Z)" в конкретные электрические сигналы для сервоприводов. Таким образом, зная конечное положение инструмента, мы с высочайшей точностью вычисляем необходимые углы поворота для каждого двигателя, что и обеспечивает точное и управляемое движение всего станка.

Был написан файл, описывающий 7-осевой манипулятор (роботизированную руку). У него 7 степеней свободы, что позволяет ему достигать очень сложных положений в пространстве. Которые представляют собой:

* 6 осей вращения (суставы joint1 - joint6, тип revolute),
* 1 ось поступательного движения (сустав joint7, тип prismatic), который, выдвигает рабочий инструмент,
* 1 фиксированное крепление для инструмента (tool\_attachment\_joint, тип fixed).

Каждый сустав описывается определёнными тегами в xml структуре:

* name="joint2": Уникальное имя сустава.
* type="revolute": Тип сустава — вращательный. Он работает как шарнир.
* <limit lower="-1.04720" upper="1.57080": Ограничения движения в радианах. Этот сустав может поворачиваться в диапазоне от -1.047 рад (≈ -60°) до 1.57 рад (≈ +90°).
* <origin rpy="..." xyz="...": Это самое важное — положение и ориентация сустава относительно его родительского звена (parent link). Здесь xyz задает смещение, а rpy (Roll-Pitch-Yaw) задает поворот в радианах.
* <parent link="..." / <child link="...": Определяет кинематическую связь. Этот сустав соединяет звено Cylinder.011\_link (родитель) со звеном Cylinder.003\_link (потомок).
* <axis xyz="0 0 1": Определяет ось вращения сустава. 0 0 1 означает, что вращение происходит вокруг оси Z локальной системы координат сустава.

Для решения задач кинематики была использована python библиотека ikpy. Библиотека позволяет производить решение данных задач на основе предоставленного urdf файла и точки в пространстве, в которой должен оказаться инструмент робота.

Решая задачу обратной кинематики, получаем углы поворота каждого из суставов, а решая прямую – местоположение каждого из суставов в пространстве. Имея эти данные, можно визуализироваться результат путем расположения частей трехмерной модели робота в пространстве в соответствии с полученными данными.

## 2.3 Интерпретация gcode для управления станком

G-код является основным языком программирования для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), включая 3D-принтеры, фрезерные, токарные и другие станки. Файл с G-кодом представляет собой текстовый документ, содержащий последовательность команд, которые станок выполняет одну за другой для создания детали. Каждая команда (строка кода) указывает станку, какое действие совершить: переместить инструмент, изменить скорость, включить или выключить охлаждение и так далее.

Моделируемым станком используется g-code генерируемый программным комплексом UltiMaker Cura. Хотя он генерирует код для 3д принтеров, генерируемый им команды для движения инструмента вполне пригодны для использования электроэрозионным станком.

Команды G-кода состоят из "слов", каждое из которых начинается с буквы, за которой следует числовое значение. Буква определяет тип команды, а число — её параметр.

Нас интересуют «G» команды, которые описывают движение инструмента, а именно:

* G0: Быстрое (холостое) перемещение. Инструмент движется на максимальной скорости в указанную точку (X, Y, Z). Эта команда используется для перемещения инструмента между операциями, когда обработка материала не производится.
* G1: Линейная интерполяция (рабочая подача). Это одна из самых важных команд. Инструмент перемещается по прямой линии в заданные координаты с определённой скоростью подачи F. Эта команда используется для резки материала или экструзии пластика в 3D-печати.

А также, параметры - буквы, уточняющие действие команды:

* X, Y, Z: Координаты целевой точки по соответствующим осям.
* F: Скорость подачи (Feedrate). Указывает, с какой скоростью должен двигаться инструмент во время выполнения команд G1, G2, G3. Измеряется в мм/мин или мм/с.
* E: Количество экструдируемого материала (в 3D-печати). Указывает, сколько филамента должно быть выдавлено во время движения.

Таким образом путем анализа g-код файла можно составить массив, который будет содержать все точки, через которые должен будет пройти инструмент. Далее для этих точек можно решать прямую и обратную задачи кинематики и моделировать удаление материала м заготовки.

## 2.4 Модель удаления материала

Учитывая стохастическую природу процесса ЭЭО и сложность точного моделирования каждого отдельного разряда и его взаимодействия с уже измененной поверхностью, было принято решение сосредоточиться на модели, которая позволяет напрямую оценить макроскопический результат воздействия – объем удаленного материала без необходимости детального моделирования всех микроскопических явлений. В разделе 1.6.8 упоминаются модели, позволяющие напрямую определить объем удаленного единичным разрядом материала, в частности, модель, основанная на энергетическом балансе. Такой подход позволяет прогнозировать основной результат обработки – изменение геометрии заготовки с приемлемой для симулятора точностью и скоростью.

Таким образом, в качестве основы для симуляции процесса удаления материала была выбрана математическая модель, базирующаяся на энергетическом балансе одиночного электрического разряда. Эта модель описана в научной литературе, в частности, в работе [22] (Gulbinowicz Z., Goroch O., Skoczylas P. "Mathematical Modeling of Material Erosion During the Electrical Discharge"), и упоминается в разделе 1.6.8.

Основная идея модели заключается в том, что лишь часть общей энергии электрического импульса (Ec​) расходуется непосредственно на удаление материала (плавление и испарение) с поверхности заготовки. Эта доля энергии (Erem​ или Eef​ в терминах статьи [22]) определяется коэффициентом использования энергии (Ca​).

Объем материала (ΔV), удаляемого за один импульс, рассчитывается по формуле, связывающей энергию, пошедшую на удаление, с теплофизическими свойствами материала и энергией, необходимой для его нагрева, плавления и испарения:

(1)

где:

* ​ – энергия, затраченная на удаление материала;
* U – напряжение импульса;
* I – ток импульса;
* ti​ – длительность импульса;
* Ca​ – коэффициент использования энергии;
* ρ – плотность материала заготовки;
* rv​ – теплота испарения материала;
* Lm​ – теплота плавления материала;
* C – удельная теплоемкость материала;
* Tm​ – температура плавления материала;
* Tb​ – температура кипения материала;
* T0​ – начальная температура материала;
* α – коэффициент, представляющий долю материала, удаляемого за счет испарения (остальная часть (1−α) удаляется за счет плавления и последующего выброса).

Данная модель позволяет напрямую оценить объем удаленного материала, что является важнейшим моментом в моделирования изменения геометрии заготовки в симуляторе. При этом она не требует сложного моделирования плазменного канала, гидродинамики диэлектрика или детального температурного поля во всем объеме заготовки, что существенно снижает вычислительные затраты. Предполагается, что форма единичного кратера может быть упрощена, например, до цилиндрической или полусферической, для дальнейшего моделирования результирующей поверхности.

## 2.5 Алгоритм расчета

Предполагается, что общий объем удаленного материала равен объему удаленного за один разряд материала умноженный на количество разрядов. А получившийся кратер будет цилиндрической формы диаметр которого будет примерно равен диаметру электрода, а высота будет равна общему объёму удаленного материала, деленному на площадь сечения электрода. Схема работы разработанной модели представлена на рисунке 2.

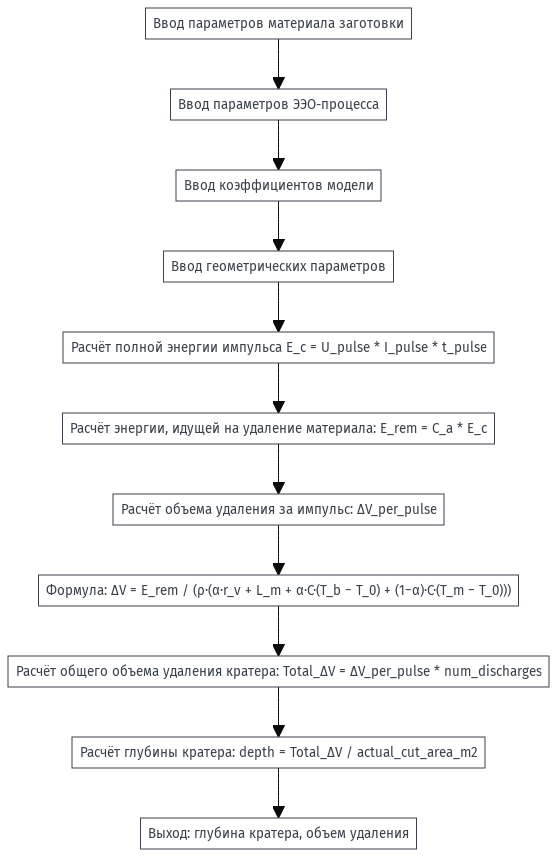


Рисунок ???? – Модель процесса электроэрозионной обработки

Таким образом у нас имеются: трехмерная модель станка, описание структуры манипулятора в urdf формате, возможность моделирования его движений с помощью решения задач прямой и обратной кинематики, модель позволяющая предсказывать удаление материала исходя из параметров эрозии.

Далее, на основе разработанных моделей предстоит разработать прототип программного обеспечения для тестирования возможности их применения в симуляторе электроэрозионного станка.

# 3 Экспериментальная часть

## 3.1 Реализация прототипа

Прототип симулятора реализован на языке программирования Python. Для решения задачи инверсной кинематики используется библиотека `ikpy`, которая по заданным координатам и ориентации конечного звена (инструмента) вычисляет необходимые угловые положения для каждого сочленения робота-манипулятора. Кинематическая модель манипулятора описана в файле `unnamed.urdf`.

Визуализация процесса моделируется с помощью САПР OpenSCAD. Программный код на Python динамически генерирует файл `config.scad`, содержащий параметры для 3D-модели: вычисленные положения звеньев манипулятора и координаты точек обработки. Затем из командной строки вызывается OpenSCAD для рендеринга 3D-сцены и сохранения результата в виде PNG-изображения в директорию `imgs`.

В качестве входных данных для траектории движения инструмента используется G-code файл (`AA8\_test1.gcode`), который парсится с помощью `gcode\_parser.py`. Физическая модель эрозии, реализованная в `model.py`, рассчитывает глубину и радиус кратера на основе свойств обрабатываемого материала (сталь C45) и заданных электрических параметров (напряжение, ток, длительность импульса).

## 3.2 Описание эксперимента

Целью эксперимента является проверка корректности разработанных моделей: кинематической модели манипулятора и физической модели процесса электроэрозионной обработки.

Эксперимент состоит в симуляции обработки детали по траектории, заданной в G-code файле. В `main.py` задаются начальные условия:

* Свойства обрабатываемого материала (сталь С45).
* Электрические параметры разряда.
* Диаметр электрода.

Симулятор выполняет следующие шаги:

1. Загружает траекторию из G-code файла.
2. На основе физической модели рассчитывает параметры эрозионного воздействия (размеры единичного кратера).
3. Последовательно проходит по точкам траектории, для каждой из них решая задачу инверсной кинематики, чтобы определить конфигурацию манипулятора.
4. На каждом шаге генерирует 3D-визуализацию, на которой показано удаление материала в текущей точке. Это позволяет наглядно отследить процесс формирования итоговой геометрии детали.

## 3.3 Результаты эксперимента

Основным результатом эксперимента является серия PNG-изображений, сохраненная в директории `imgs`. Каждое изображение представляет собой кадр симуляции, демонстрирующий положение манипулятора и форму обрабатываемой детали в конкретный момент времени.

Изображение выглядит как игрушка

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Рисунок ???? – Пример результата работы симулятора

Полученная последовательность изображений позволяет провести качественную оценку работы симулятора:

* Визуально подтверждается корректность работы кинематической модели — манипулятор перемещается в соответствии с траекторией из G-code.
* Наглядно демонстрируется процесс постепенного удаления материала, что соответствует физической модели эрозии.
* Финальные изображения показывают итоговую форму детали, полученную в результате симуляции.

Таким образом, эксперимент подтвердил работоспособность прототипа и корректность заложенных в него моделей. Визуальные результаты служат доказательством того, что разработанные алгоритмы правильно интерпретируют входные данные и адекватно моделируют процесс электроэрозионной обработки.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках производственной практики была успешно решена задача разработки и тестирования прототипа программного обеспечения для симуляции процесса электроэрозионной обработки. Был создан комплексный программный инструмент, который эффективно интегрирует в себе несколько ключевых компонентов: трехмерную кинематическую модель манипулятора, описанную в формате URDF, модуль для решения обратной задачи кинематики на базе библиотеки ikpy, и физическую модель, предсказывающую удаление материала.

Проведенный эксперимент, заключавшийся в симуляции обработки детали по траектории из G-code файла, полностью подтвердил работоспособность предложенного подхода. Визуальные результаты, полученные в виде серии PNG-изображений, наглядно продемонстрировали корректность работы как кинематической, так и физической моделей. Манипулятор точно следовал заданной траектории, а процесс эрозии адекватно отражал постепенное формирование геометрии детали.

Таким образом, можно сделать вывод, что основные цели практики были достигнуты. Разработанный прототип является важным шагом к созданию полноценного виртуального симулятора электроэрозионного станка. Такое программное обеспечение имеет значительный практический потенциал, поскольку позволяет проводить отладку управляющих программ без использования реального оборудования, визуализировать процесс обработки для обучения персонала и прогнозировать итоговый результат с минимальными затратами.

Дальнейшее развитие проекта заключается в создании реалистичного симулятора электроэрозионного станка на базе Unreal Engine.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Савицкий В.В. Электроэрозионные методы обработки материалов: учебное пособие для вузов – Витебск: УО "ВГТУ", 2006. – 276 с.
2. Ширяев В.В., Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Пустовалов Д.О., Смоленцев Е.В. Влияние микроструктуры электродаинструмента на эффективность процесса электроэрозионной обработки материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 75–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.09
3. Абляз Тимур Ризович, Ханов Алмаз Муллаянович, Севастьянов Валерий Васильевич Влияние межслойного зазора между заготовками на стабильность процесса пакетированной электроэрозионной обработки // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. №4-5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mezhsloynogo-zazora-mezhdu-zagotovkami-na-stabilnost-protsessa-paketirovannoy-elektroerozionnoy-obrabotki (дата обращения: 02.03.2025).
4. Working principles of electrical discharge machining. – Текст : электронный // Phillips Corp : [сайт]. – [India], 2022. – Обновлено 26.04.2022. – URL: https://phillipscorp.com/india/working-principles-of-electrical-discharge-machining/ (дата обращения: [15.03.2025])
5. Sild, S. Electrical Discharge Machining – Different Types, Applications, Pros & Cons / S. Sild. – Text : electronic // Fractory : [сайт]. – [Б. м.], 2022. – Обновлено 08.08.2022. – URL: https://fractory.com/electrical-discharge-machining-explained/ (дата обращения: [24.05.2025]).
6. Марадиа, У. Моделирование и симуляция электроэрозионной обработки / У. Марадиа, К. Вегенер. — Текст : непосредственный // Электроэрозионная обработка (EDM): типы, технологии и применение . — New York : Nova Science Publishers, 2015. — С. 67–121.
7. Weingärtner, E. Modeling and simulation of electrical discharge machining / E. Weingärtner, F. Kuster, K. Wegener. – Text : electronic // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 2. – P. 95–100. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.043. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112001448 (дата обращения: [05.04.2025]).
8. Al-Mukhtar, S. Electrical Discharge Machining: A Complete Overview / S. Al-Mukhtar. – Text : electronic // Geomiq : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: https://geomiq.com/blog/electrical-discharge-machining/ (дата обращения: [05.04.2025])
9. EDM Machining: Construction and Working Principle Discussed. – Текст : электронный // BDE Manufacturing Technologies : [блог]. – [Б. м.], 2021. – Опубликовано 25.06.2021. – URL: https://www.bdeinc.com/blog/edm-machining-construction-and-working-principle-discussed/ (дата обращения: [05.04.2025]).
10. CNC Wire EDM Software. – Текст : электронный // BobCAD-CAM : [сайт]. – [Б. м.], cop. 2025. – URL: <https://bobcad.com/products/wire-edm/> (дата обращения: [05.04.2025]).
11. GO Wire EDM. – Текст : электронный // GibbsCAM : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: https://www.gibbscam.com/en/go-wire-edm (дата обращения: [05.04.2025]).
12. Wire EDM. – Текст : электронный // CAMWorks : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: <https://camworks.com/modules/wire-edm/> (дата обращения: [10.04.2025]).
13. CAD/CAM. – Текст : электронный // MITSUBISHI ELECTRIC Factory Automation : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/mecha/edm/items/cadcam/index.html> (дата обращения: [11.04.2025]).
14. Progress in Simulation Modeling Based on the Finite Element Method for Electrical Discharge Machining / L. Li, S. Sun, W. Xing, Y. Zhang, Y. Wu, Y. Xu, H. Wang, G. Zhang, G. Luo. – Text : electronic // Metals. – 2024. – Vol. 14, iss. 1. – P. 14. – DOI: 10.3390/met14010014. – URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/14/1/14 (дата обращения: [12.04.2025]
15. Numerical simulation of micro-EDM model with multi-spark / K. P. Somashekhar, S. Panda, J. Mathew, R. Nottath. – Text : electronic // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 68, iss. 1-4. – P. 83–90. – DOI: 10.1007/s00170-013-5319-9. – URL: https://www.researchgate.net/publication/272591096\_Numerical\_simulation\_of\_micro-EDM\_model\_with\_multi-spark (дата обращения: [16.04.2025]).
16. Nahak, B. A review on optimization of machining performances and recent developments in electro discharge machining / B. Nahak, A. Gupta. – Text : electronic // Manufacturing Review. – 2019. – Vol. 6. – P. 2 (article number). – 22 p. – DOI: 10.1051/mfreview/2018015. – URL: https://mfr.edp-open.org/articles/mfreview/pdf/2019/01/mfreview180009.pdf (дата обращения: [16.04.2025]).
17. Joshi, A. Y. A systematic review on powder mixed electrical discharge machining / A. Y. Joshi, A. Y. Joshi // Heliyon. – 2019. – Vol. 5. – Art. e029631. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02963.
18. Liu, J. F. Thermal Modeling of EDM with Progression of Massive Random Electrical Discharges / J. F. Liu, Y. B. Guo. – Text : electronic // Procedia Manufacturing. – 2016. – Vol. 5. – P. 495–507. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.041. – URL: https://www.researchgate.net/publication/309891807\_Thermal\_Modeling\_of\_EDM\_with\_Progression\_of\_Massive\_Random\_Electrical\_Discharges (дата обращения: [17.04.2025]).
19. Progress in Simulation Modeling Based on the Finite Element Method for Electrical Discharge Machining / L. Li, S. Sun, W. Xing [et al.]. – Text : electronic // Metals. – 2024. – Vol. 14, iss. 1. – Art. 14. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/1/14>
20. Salonitis, K. Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die-sinking EDM / K. Salonitis, A. Stournaras, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris. – Text : electronic // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 40. – P. 316–323. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-007-1327-y>
21. Bellotti, M. Tool Wear and Material Removal Predictions in Micro-EDM Drilling: Advantages of Data-Driven Approaches / M. Bellotti, M. Wu, J. Qian, D. Reynaerts. – Text : electronic // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, iss. 18. – Art. 6357. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6357>
22. Gulbinowicz, Z. Mathematical Modeling of Material Erosion During the Electrical Discharge / Z. Gulbinowicz, O. Goroch, P. Skoczylas // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2020. – Vol. 14, № 2. – P. 27–33. – DOI: 10.12913/22998624/114959.