

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Фролов Алексей Валерьевич

**Разработка математической модели траектории  
перемещения сварочной горелки при роботизированной сварке**

Направление подготовки 01.04.02  
«Прикладная математика и информатика»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель

кандидат физико-математических наук,  
доцент Григорьева Анна Леонидовна

Рецензент

кандидат физико-математических наук,  
доцент Анисимов Антон Николаевич,  
доцент кафедры информационной  
безопасности, информационных систем  
и физики ФГБОУ ВО «АмГПУ»

Защита состоится «19» июня 2026 года в 08 часов 10 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г.Комсомольск-на-Амуре, пр.Ленина, 27, ауд. 203/5.

Автореферат разослан «03 » июня 2026 г.

Секретарь ГЭК



Д.В.Чернышова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### *Актуальность работы*

Сварочные технологии являются неотъемлемой частью большого количества современных сборочных производств в различных отраслях народного хозяйства – от топливно-энергетической до судо-, авиа- и ракетостроения. Траектория перемещения сварочного электрода во время сварки толстостенных конструкций представляется важным параметром, влияющим на геометрию сварного шва, микроструктуру металла шва и околошовной зоны, уровень остаточных механических напряжений и пористость, что в конечном счёте определяет механические характеристики сварного соединения и его качество. Для ручной дуговой сварки существует более 15 типов рекомендуемых траекторий перемещения сварочного электрода в зависимости от взаимного расположения свариваемых деталей, типа разделки кромок и пространственного положения сварного шва. Но роботизированные сварочные комплексы поддерживают, в лучшем случае, не более 4 типов перемещений сварочной горелки. Автоматизированные сварочные установки позволяют производить сварку с 1 – 2 типами осцилляций сварочной горелки. В тоже время системы управления роботизированными и автоматизированными сварочными комплексами имеют возможность задания достаточно сложных траекторий перемещения рабочего инструмента. Но эти перемещения должны быть заданы в виде полилинии, состоящей из дуг окружностей или отрезков прямых. В связи с чем разработка математической модели траектории перемещения сварочной горелки на основе полилинии из дуг окружностей или отрезков прямых представляется актуальной задачей, решение которой позволит автоматизировать процесс генерации управляющего кода для сварочных роботов и автоматизированных станков.

### *Цель работы*

Целью работы является разработка математической модели траектории перемещения сварочной горелки при роботизированной сварке, а также программного обеспечения (ПО) для реализации этой модели.

### *Задачи работы:*

- провести анализ существующих математических и алгоритмических решений в области управления сварочной горелкой во время процесса сварки;
- провести анализ существующего ПО для управления сварочными роботами;
- провести анализ стандарта разработки управляющих программ для станков с ЧПУ и роботизированных манипуляторов;
- разработать универсальную параметрической математическую модель перемещения сварочной горелки при направлении сварного шва вдоль одной из осей координат, а также алгоритм переноса полученной математической модели на другие пространственные положения сварного стыка и на криволинейную систему координат;
- разработать программу генерации управляющего кода для существующих систем управления станками с ЧПУ и роботами-манипуляторами;
- разработать программный модуль непосредственного управления электроприводами автоматизированной сварочной системы;
- опробовать полученные программы в программном симуляторе и на реально существующей сварочной установке;
- разработать методические рекомендации студентам для выполнения лабораторных работ на изготовленном оборудовании с применением разработанных программ.

### *Методология*

Методологическую основу исследования составили общенаучные методы анализа, синтеза, а также методы систематизации, обобщения и

моделирования. В ходе работы активно использовались методы теоретического анализа научной и научно-практической литературы, нормативных документов и практических решений. Также применялись методы прикладного программирования.

#### *Научная новизна*

Научная новизна диссертационной работы заключается в:

- разработке математической модели универсальной параметрической траектории перемещения сварочной горелки в процессе роботизированной сварки с использованием относительно простых математических функций;
- разработке алгоритма цифрового деления частоты тактовых сигналов с переменным дробным коэффициентом деления для синхронного управления электродвигателями сервоприводов сварочной установки с целью более точного перемещения сварочной горелки в заданном направлении с заданной неизменной скоростью.

#### *Практическая значимость*

Практическая значимость заключается в:

- разработке программы для автоматизации генерирования сварочной управляющей программы на G-кодах для существующих систем управления станками с ЧПУ и роботами-манипуляторами;
- разработке программы управления непосредственно сервоприводами сварочной установки, обеспечивающей адаптацию траектории и скорости перемещения сварочной горелки при выполнении криволинейных сварных швов;
- изготовлении лабораторной установки автоматизированной сварки;
- подготовке методических указаний для проведения лабораторных работ на установке автоматизированной сварки.

#### *Структура работы*

Работа включает введение, три главы, заключение и список использованных источников. Во введении раскрыта актуальность решаемой задачи. В первой главе рассмотрены практические основы применения

осциллиций сварочной горелки во время сварки, рекомендуемые типы осциллиций, технические возможности существующих систем управления сварочными роботами по применению осциллиций сварочной горелки во время сварки. Во второй главе приводятся математические модели существующих типов осциллиций сварочной горелки, предложена универсальная траектория сварочного электрода и его математическая модель, разработан алгоритм переноса базовой математической модели на произвольную прямоугольную систему координат и на систему координат с криволинейной осью сварного шва. Математические модели представляют траекторию перемещения сварочной горелки в виде фрагментов дуг окружностей и предусматривают расчёт параметров этих дуг: координат точек начала и конца дуг, а также координат центров и радиусов дуг для обеспечения совместимости результатов со стандартом программирования сварочных роботов. Также предлагается алгоритм непосредственного синхронного управления электроприводами сварочной установки, обеспечивающий перемещение сварочной горелки с заданной переменной скоростью и максимальным приближением его траектории к дугам окружностей. В третьей главе приводятся результаты практической реализации разработанной математической модели: программа автоматического синтеза управляющего кода для сварочных автоматов и роботов, результаты модернизации сварочных установок, результаты тестирования сварочных траекторий на физических образцах, практическая часть лабораторного практикума для студентов. В заключении указаны основные результаты работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*В введении* обоснована актуальность разработки математической модели универсальной траектории перемещения сварочной горелки во время сварки для повышения эффективности сварочных операций. Показана новизна предлагаемого решения, определены цели и задачи работы.

В 1 главе, первом подразделе говорится, что во время сварки толстостенных конструкций сварочный электрод должен совершать не только поступательное перемещение вдоль шва, но и поперечные колебательные движения. Это способствует формированию сварочной ванны нужных геометрических параметров и задаёт длительность её существования в расплавленном состоянии, условия её кристаллизации и термической обработки ранее нанесённого металла шва. В результате колебания сварочной горелки позволяют сформировать сварной шов с заданной геометрией, равномерным химическим составом по всему объёму шва, обеспечить удаление шлака и пор из металла шва, с заданной микроструктурой, и с минимизацией внутренних напряжений. Отмечается, что неправильная техника манипулирования сварочной горелкой приводит к возникновению ряда сварочных дефектов, в том числе: подрезам непроварам, наплывам, порам, прожогам, неравномерности геометрических размеров шва.

Во втором подразделе приводятся траектории перемещения сварочного электрода, рекомендованные для ручной дуговой сварки (рис. 1) и указания по области применения этих траекторий.

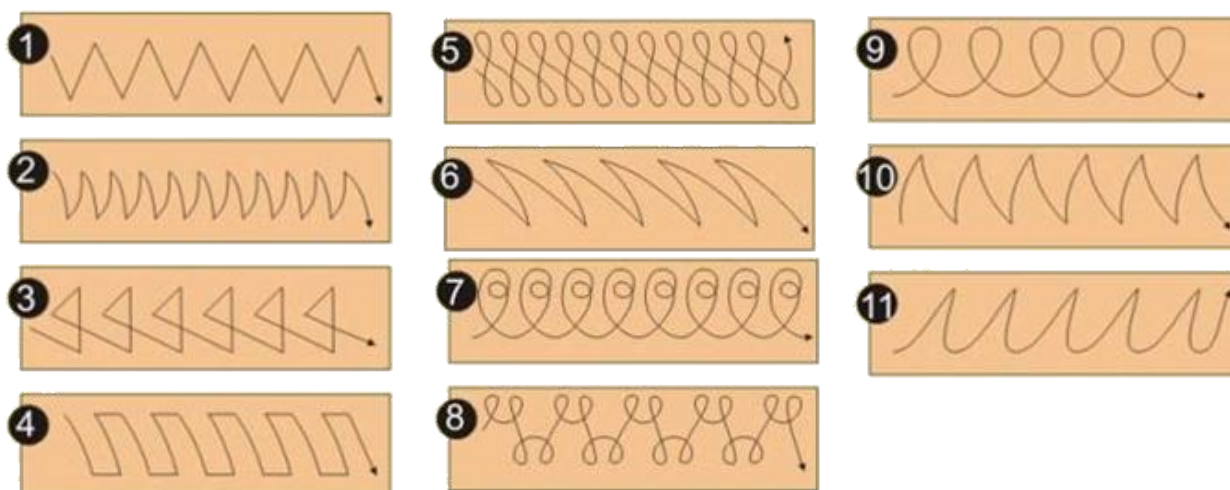


Рисунок 1 – Рекомендуемые траектории перемещения сварочного электрода во время сварки

В третьем подразделе указываются технические возможности современных сварочных роботов по манипулированию сварочной горелкой. Отмечается, что часть роботов не имеет такой возможности, а некоторые

роботы позволяют выполнять не более 4 типов осцилляций: зигзаг, трапеция, восьмёрка, петля, которых недостаточно для выполнения швов в вертикальном и потолочном положениях.

Также в этом подразделе раскрывается, что системы управления промышленными роботами и сварочными установками на базе станков с ЧПУ работают только с двумя типами траекторий: линейной и дугой окружности. Более сложные траектории реализуются за счёт комбинации линейных и круговых перемещений. Поэтому ручное написание управляющей программы для сложной сварочной траектории представляется экономически неэффективным. Готовое ПО для автоматизации этого процесса обнаружить не удалось. При разработке ПО для совместимости с существующими системами управления роботами и сварочными установками необходимо опираться на использование интерполяции перемещений по прямой или дуге окружности.

*Во 2 главе* в первом подразделе приводятся математические модели, описывающие элементарные перемещения сварочной горелки при сварке с заданной траекторией осцилляций. Предложены математические описания для 22 вариантов траекторий. Математические описания содержат формулы расчёта координат точек перехода элементарных перемещений и параметров этих элементарных перемещений. В формулах используются максимально простые математические функции (тригонометрические, простейшие арифметические, квадратичная и квадратного корня).

Второй подраздел посвящён классификации сварочных траекторий, на основе которой предложена универсальная параметрическая двухшажная траектория перемещения сварочной горелки, состоящая из дуг окружностей (рис. 2). Для упрощения математического описания считается, что ось сварного шва совпадает с осью абсцисс, а начало шва – с центром системы координат. Для указанной двухшажной траектории приводится расчёт координат точек перехода элементарных перемещений с учётом плавности

их перехода друг в друга, а также расчёт параметров этих дуг: координат центров и значения радиусов.

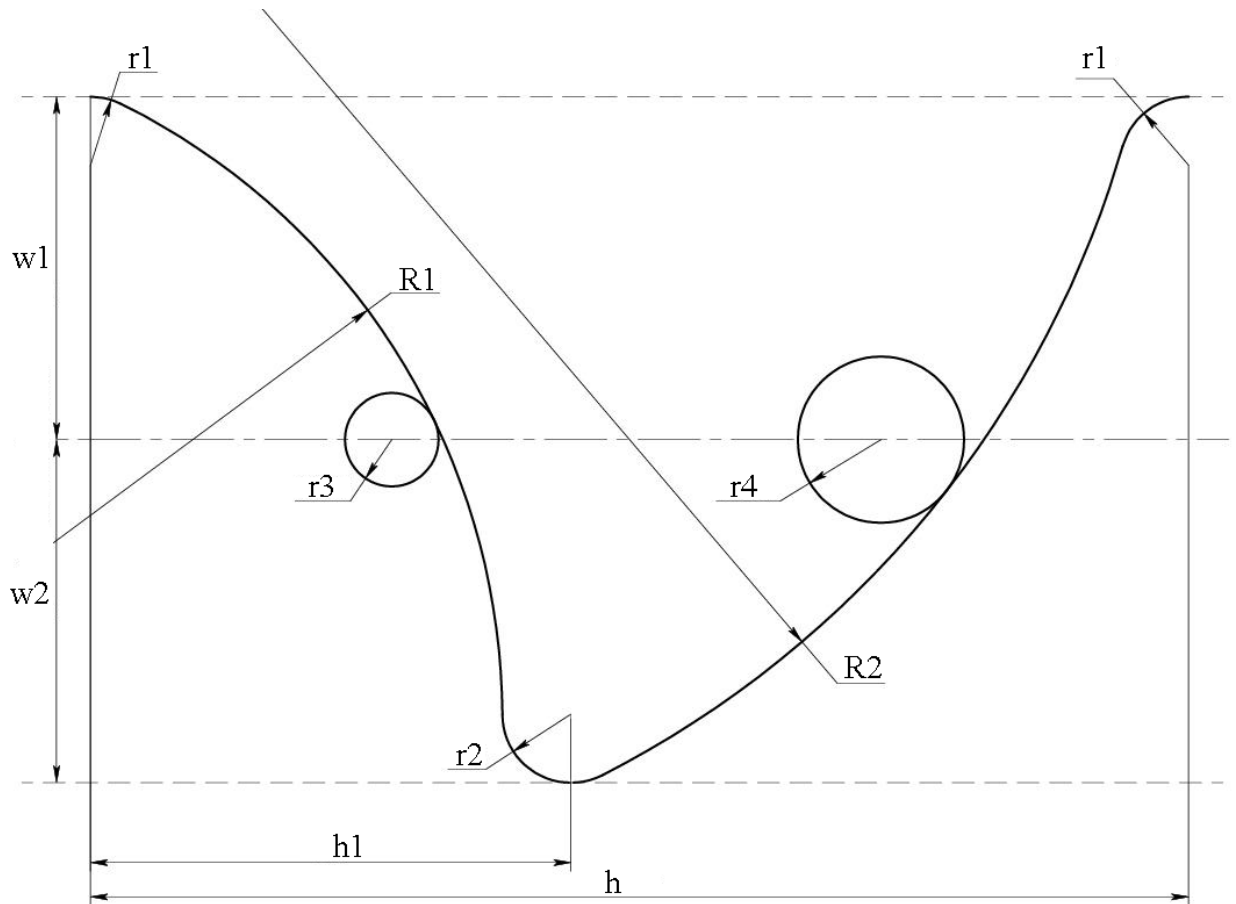


Рисунок 2 – Эскиз универсальной двухшажной траектории перемещения сварочной горелки

Получены следующие расчётные формулы для дуги R1:

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq 0 \\ -1, & \text{при } x < 0 \end{cases}; \quad \text{Angle}(a, b, c) = \text{acos} \left( \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c} \right);$$

$$b1 = (|\text{width1}| - |r1|) \cdot \text{Sign}(\text{width1}); \quad h1 = \text{step} \cdot \text{halfstep};$$

$$b2 = (|\text{width2}| - |r2|) \cdot \text{Sign}(\text{width2}); \quad d = \sqrt{h1^2 + (b1 + b2)^2};$$

$$\alpha = \text{Angle}((|R1| - r1), (|R1| - r2), d) \cdot \text{Sign}(R1);$$

$$\beta = \text{acos} \left( \frac{|b1 + b2|}{d} \right) \cdot \text{Sign}(h1); \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - \beta - \alpha;$$

$$x_b = h1 + r2 \cdot \cos(\gamma); \quad y_b = -(|b2| + r2 \cdot \sin(\gamma)) \cdot \text{Sign}(b2);$$

$$x_c = h1 - (|R1| - r2) \cdot \cos(\gamma); \quad y_c = -(|b2| - (|R1| - r2) \cdot \sin(\gamma)) \cdot \text{Sign}(b2);$$

$$\theta = \text{Angle}(|R1| - r2, |R1| - r1, d) \cdot \text{Sign}(R1); \quad \sigma = \frac{\pi}{2} + \beta - \theta;$$

$$x_a = r1 \cdot \cos(\sigma); \quad y_a = (|b1| + r1 \cdot \sin(\sigma)) \cdot \text{Sign}(b1);$$

$$x_{a0} = 0; \quad x_{b0} = h1;$$

$$y_{a0} = b1; \quad y_{b0} = -b2.$$

Для дуги r3:

$$x_d = x_c + (\sqrt{(|R1| - r3)^2 - y_c^2}) \cdot \text{Sign}(R1); \quad y_d = 0;$$

$$\alpha = \text{acos}\left(\frac{|y_c|}{|R1| - r3}\right) \cdot \text{Sign}(y_c);$$

$$x_e = x_d + r3 \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{Sign}(r3); \quad y_e = r3 \cdot \sin(\alpha) \cdot \text{Sign}(r3);$$

$$x_{e'} = x_d - r3 \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{Sign}(r3); \quad y_{e'} = -r3 \cdot \sin(\alpha) \cdot \text{Sign}(r3).$$

Для дуги r2:

$$h2 = \text{step} - h1; \quad d = \sqrt{h2^2 + (b1 + b2)^2};$$

$$\beta = \text{acos}\left(\frac{|h2|}{d}\right) \cdot \text{Sign}(h2); \quad \delta = \frac{\pi}{2} + \beta + \alpha;$$

$$\alpha = \text{Angle}(|R2| - r1, |R2| - r2, d) \cdot \text{Sign}(R2);$$

$$x_f = h1 + r2 \cdot \cos(\delta); \quad y_f = -(|b2| + r2 \cdot \sin(\delta)) \cdot \text{Sign}(b2);$$

$$x_h = h1 - (|R2| - r2) \cdot \cos(\delta); \quad y_h = -(|b2| - (|R2| - r2) \cdot \sin(\delta)) \cdot \text{Sign}(b2);$$

$$\theta = \text{Angle}(|R2| - r2, |R2| - r1, d) \cdot \text{Sign}(R2); \quad \varepsilon = \frac{\pi}{2} - \beta + \theta;$$

$$x_g = h1 + h2 + r1 \cdot \cos(\varepsilon); \quad x_{g0} = h1 + h2;$$

$$y_g = (|b1| + r1 \cdot \sin(\varepsilon)) \cdot \text{Sign}(b1); \quad y_{g0} = b1.$$

Для дуг R2, r4, r1 расчётные формулы аналогичны.

За счёт изменения параметров математической модели можно гибко настроить траекторию перемещения сварочной горелки (рис. 3).

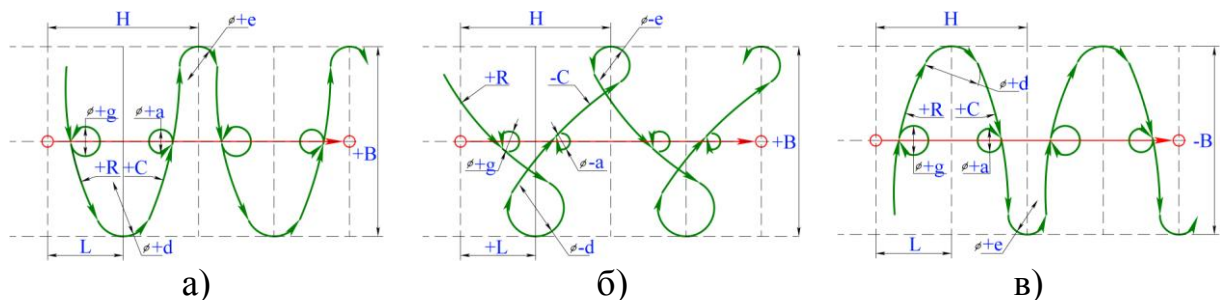


Рисунок 3 – Эскизы универсальной двухшажной траектории

Подраздел 3 посвящён вопросу переноса базовой модели на произвольную прямоугольную систему координат, смещённую и развёрнутую относительно исходной системы. Предлагается выполнять переход с помощью матриц смещения и поворота:

$$C_1 = C + \Delta C; C_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \Delta C = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix};$$

$$C_2 = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) \cdot C_1 = R_{xyz} \cdot C_1;$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}; R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix};$$

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}; R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Углы поворота вокруг координатных осей предлагается рассчитывать по координатам начальной и конечной точек оси сварного шва:

$$\vec{i} = \{1, 0, 0\}; \vec{b} = ((X_2 - X_1), (Y_2 - Y_1), (Z_2 - Z_1));$$

$$\vec{b}_{XY} = ((X_2 - X_1), (Y_2 - Y_1), 0);$$

$$C_\gamma = \frac{\vec{i} \cdot \vec{b}_{XY}}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XY}|} = \frac{X_i \cdot X_b + Y_i \cdot Y_b}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XY}|} = \frac{X_b}{|\vec{b}_{XY}|} = \frac{X_2 - X_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}};$$

$$S_\gamma = \frac{|\vec{i} \times \vec{b}_{XY}|}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XY}|} = \frac{X_i \cdot Y_b - Y_i \cdot X_b}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XY}|} = \frac{Y_b}{|\vec{b}_{XY}|} = \frac{Y_2 - Y_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}};$$

$$\gamma = \begin{cases} \arccos(C_\gamma), & S_\gamma \geq 0 \\ 2 \cdot \pi - \arccos(C_\gamma), & S_\gamma < 0 \end{cases};$$

$$\vec{b}_{XZ} = ((X_2 - X_1), 0, (Z_2 - Z_1));$$

$$C_\beta = \frac{\vec{i} \cdot \vec{b}_{XZ}}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XZ}|} = \frac{X_i \cdot X_b + Z_i \cdot Z_b}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XZ}|} = \frac{X_b}{|\vec{b}_{XZ}|} = \frac{X_2 - X_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}};$$

$$S_\beta = \frac{|\vec{i} \times \vec{b}_{XZ}|}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XZ}|} = \frac{X_i \cdot Z_b - Z_i \cdot X_b}{|\vec{i}| \cdot |\vec{b}_{XZ}|} = \frac{Z_b}{|\vec{b}_{XZ}|} = \frac{Z_2 - Z_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}};$$

$$\beta = \begin{cases} \arccos(C_\beta), & S_\beta < 0 \\ 2 \cdot \pi - \arccos(C_\beta), & S_\beta \geq 0 \end{cases}.$$

В этом же разделе рассмотрен вопрос искривления оси абсцисс базовой математической модели по дуге окружности (рис. 4):

$$x_1 = (R_c + y) \cdot \sin\left(\frac{x}{R_c} + \alpha\right) + x_c; \quad y_1 = (R_c + y) \cdot \cos\left(\frac{x}{R_c} + \alpha\right) + y_c.$$

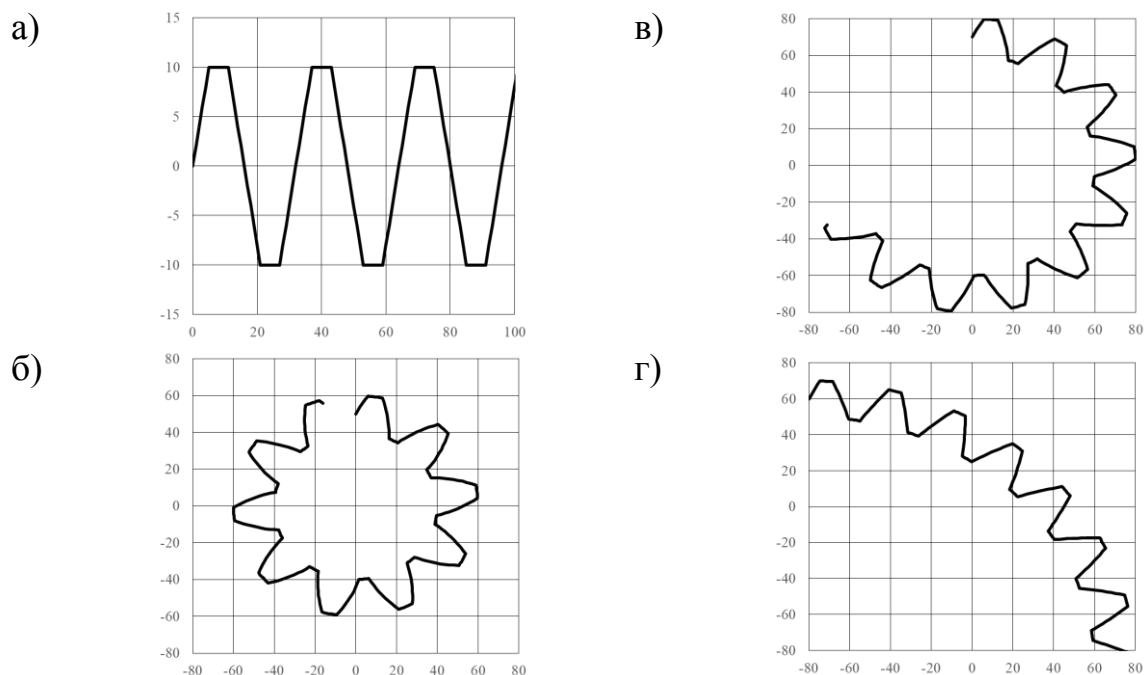


Рисунок 4 – Результаты моделирования искривления системы координат: а – исходная траектория; б – искривление оси с радиусом 50 мм; в – с радиусом 70 мм; г – с радиусом 150 мм и центром дуги в точке (-80, -90)

В подразделе 4 описывается процесс разработки алгоритма управления электроприводами сварочного автомата для практической реализации разработанной математической модели. Показано, что для обеспечения максимального соответствия траектории перемещения горелки (управляемой шаговыми электроприводами) заданной криволинейной траектории необходима синхронная работа шаговых электродвигателей всех приводов. В применяемых промышленных программируемых логических контроллерах дискретность выполнения программы (а, соответственно, и дискретность изменения сигналов управления электроприводами) задаётся длительностью цикла, минимальное значение которой составляет 1 мс. Поэтому задача синхронной работы электроприводов сводится к разработке алгоритма деления частоты с изменяемым дробным коэффициентом деления. Для обеспечения плавности перемещения сварочной горелки алгоритм деления

частоты должен располагать импульсы управления шаговыми электроприводами максимально равномерно во времени.

На основании анализа существующих методов деления частоты был разработан алгоритм деления частоты с применением принципов работы сигма-дельта модулятора с его модификацией путём предсказания значения следующего импульса и, при необходимости, сдвига этого импульса на половину периода (рис. 5, 6).

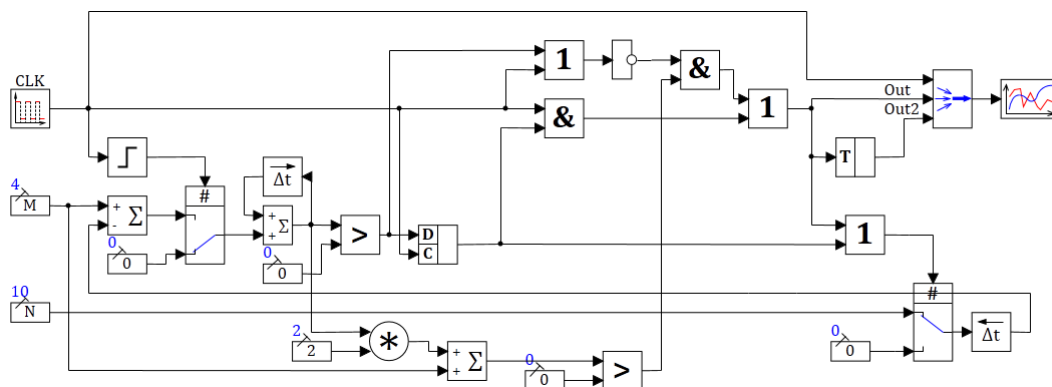


Рисунок 5 – Алгоритм работы делителя частоты с модифицированным сигма-дельта модулятором в программе *SimInTech*

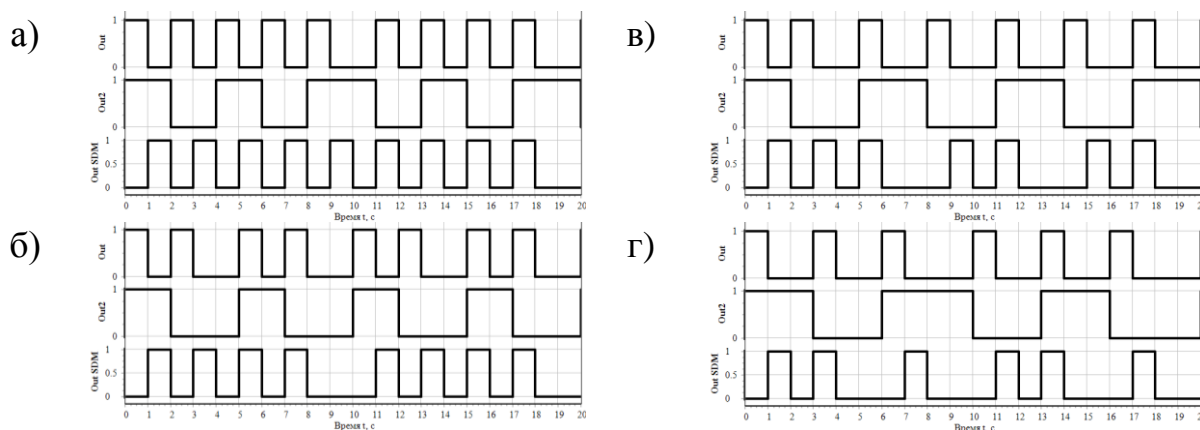


Рисунок 6 - Диаграммы работы делителя частоты с модифицированным сигма-дельта модулятором с коэффициентами деления: а – 10/9; б – 5/4; в – 10/7; г – 5/3

Алгоритм обеспечивает постоянство частоты выходных сигналов для дробного коэффициента деления  $k = \frac{n}{2}$  (где  $n$  - натуральное число). Для коэффициентов деления  $k = \frac{n}{m}$  (где  $m$  – чётное число) алгоритм обеспечивает период последовательности выходных импульсов в 2 раза меньше по

сравнению со схемой на стандартном сигма-дельта модуляторе. Для остальных исследованных коэффициентов деления этот алгоритм обеспечивает величину джиттера периода выходных сигналов в два раза меньше, чем стандартная схема.

В третьей главе приводятся результаты практической реализации результатов работы. Демонстрируются возможности разработанной программы, генерирующей управляющий код для станков с ЧПУ или роботов. Программа считывает из текстового файла исходные данные, включающие координаты конечных точек элементов сварного шва, тип траектории сварочной горелки, параметры этой траектории, скорость перемещения и величину сварочного тока. В результате выполнения программы формируется файл с управляющим кодом для сварочного автомата по стандарту *ISO 6983-1-2009*. Пример моделирования перемещения сварочной горелки – на рис. 7.

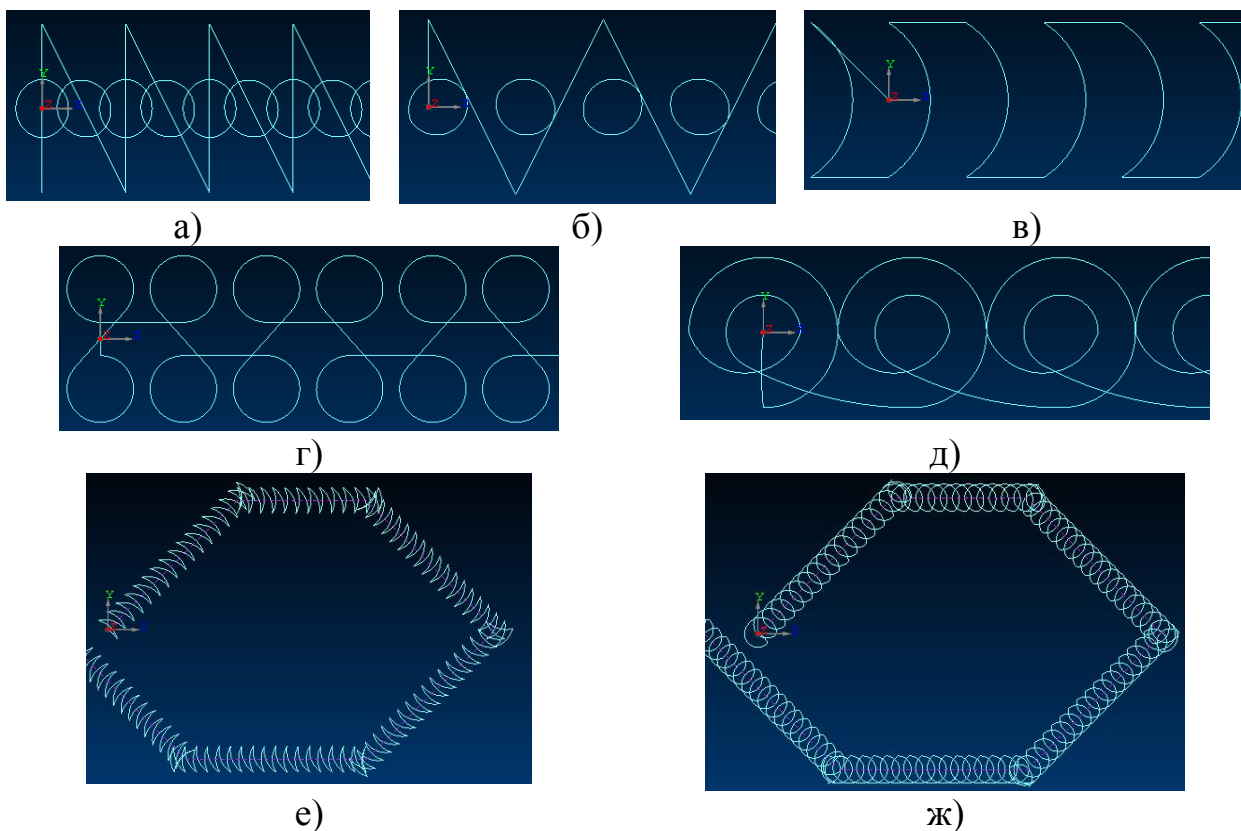
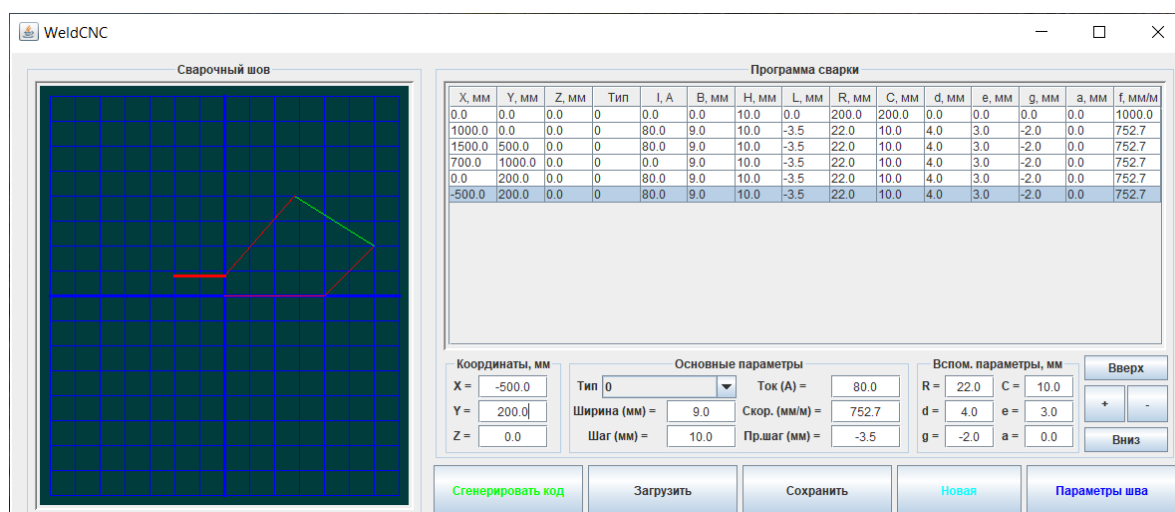
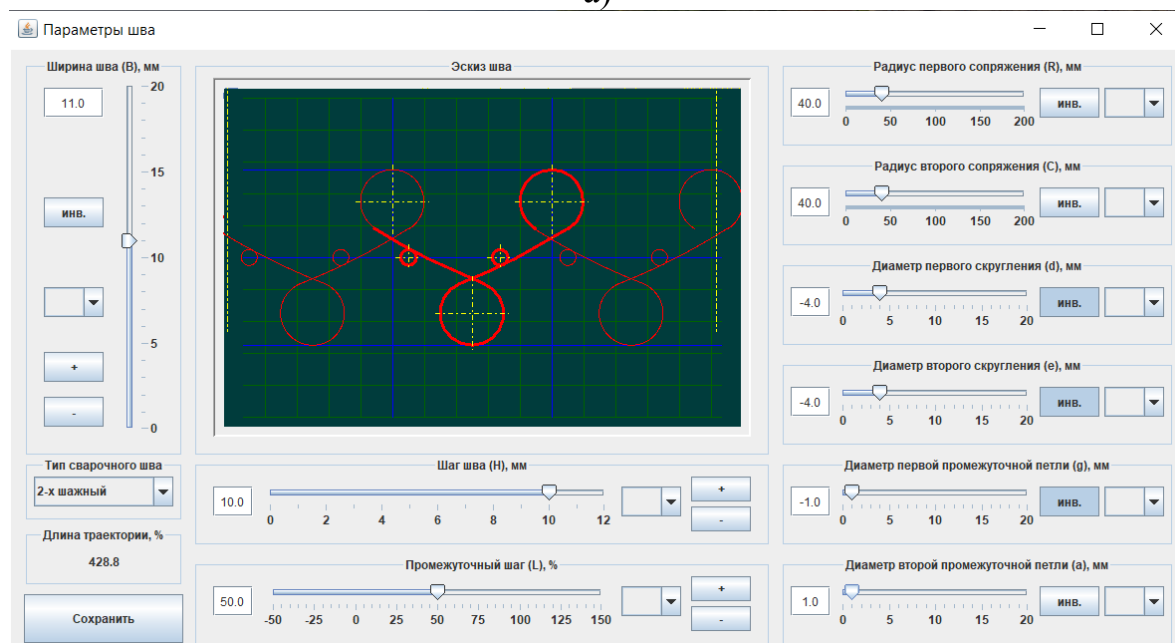


Рисунок 7 – Результаты симуляции траекторий перемещения сварочной горелки различных типов

Пользовательский интерфейс программы (рис. 8) позволяет визуализировать и упростить конфигурирование описанной программы.



а)



б)

Рисунок 8 – Окна программы *WeldCNC*: а – главное окно; б – окно настройки параметров шва

Приводятся результаты разработки лабораторного оборудования для автоматической сварки, а также результаты опробования лабораторного оборудования под управлением разработанной программы на реальных образцах (рис. 9 - 11).

В этой же главе описан разработанный лабораторный практикум, в том числе: теоретическая часть; описание работы с программой «WeldCNC»; задания к лабораторным работам (8 работ); примеры управляющих программ для получения различных траекторий перемещения сварочной горелки.

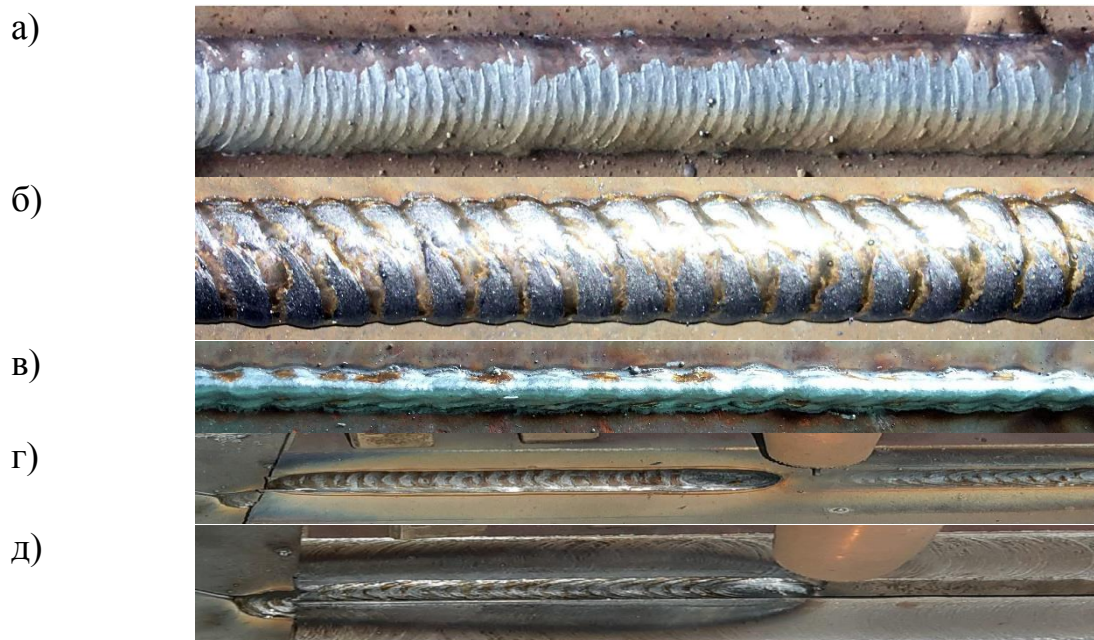


Рисунок 9 – Образцы сварных швов листовых заготовок при различных типах перемещения сварочной горелки

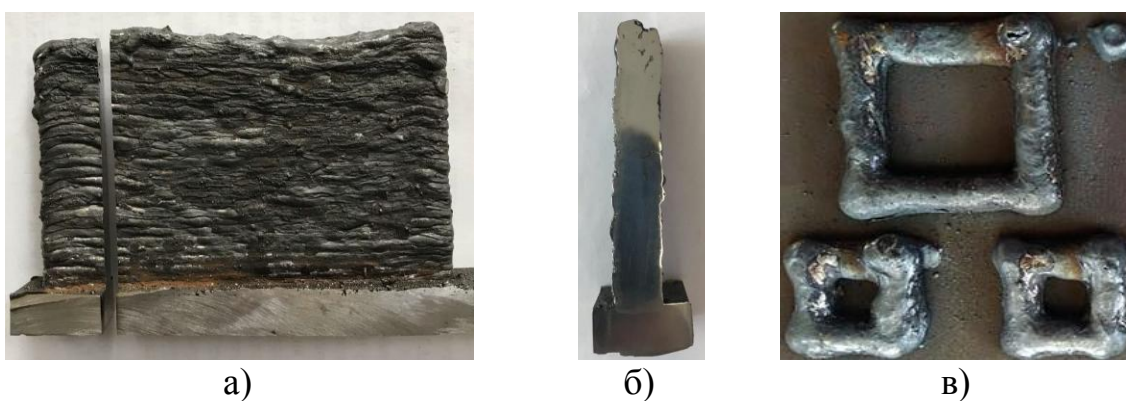


Рисунок 10 – Образцы наплавочных швов

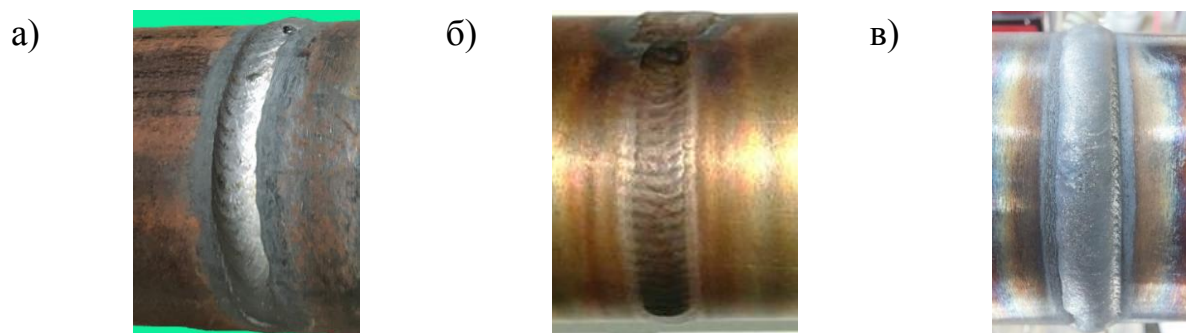


Рисунок 11 – Образцы кольцевых швов

*В заключении* приводятся основные результаты работы.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. Frolov, A. V. Automation the Welding Trajectory Control / A.V. Frolov // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020 9271607 DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271607.
2. Frolov, A. V. Pipe welding machine modernization / A. V. Frolov // Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok, 07–08 октября 2021 года. – Vladivostok, 2021. – P. 012016. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012016.
3. Frolov, A. V. The experience of the portal machine control system modernizing for automatic arc welding and surfacing in a shielded gas / A. V. Frolov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 622-631. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0\_66. – EDN DPPMLB.
4. Бахматов, П. В. Исследование влияния техники манипулирования рабочим торцом электрода при TIG сварке на качество формирования шва / П. В. Бахматов, А. В. Фролов, А. С. Кравченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2021. – № 3(51). – С. 90-94. – DOI 10.17084/20764359-2021-51-90.
5. Бахматов, П. В. Управление процессом GTAW : лабораторный практикум / П. В. Бахматов, А. В. Фролов, А. С. Кравченко. – Комсомольск-на-Амуре : КнАГУ, 2023. – 88 с. – ISBN 978-5-7765-1548-4. – EDN WRQFBB.
6. Войтович, Р. А. Обзор технологий управления сварочными роботами / Р. А. Войтович, М. М. Короткий, А. В. Фролов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 15-18.
7. Войтович, Р. А. Применение алгоритма цифрового деления частоты для управления электроприводом сварочного вращателя / Р. А.

Войтович, А. В. Фролов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 23-26. – EDN OTWJVY.

8. Короткий, М. М. Применение методики проектирования конечных автоматов для разработки управляющей программы установки автоматической сварки / М. М. Короткий, А. В. Фролов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 48-51.

9. Короткий, М. М. Управление шаговым электроприводом сварочного вращателя с помощью программируемого логического контроллера / М. М. Короткий, А. В. Фролов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 347-349. – EDN AEYJAP.

10. Павлюченко, П. В. Разработка устройства и отработка режимов автоматической сварки трубных досок / П. В. Павлюченко, П. В. Бахматов, А. В. Фролов // Metallurgy: technologies, innovations, quality : Труды XXI Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 323-329. – EDN BUQKBU.

11. Пелых, С. Н. Модернизация системы управления установкой для сварки труб на базе сварочного вращателя М-211080 / С. Н. Пелых, А. В. Фролов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. Том Часть 2. –

Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 329-330. – EDN DUQAIU.

12. Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочно-наплавочного валика, в том числе и в применении аддитивных технологий, на установке автоматической сварки в защитных газах / П. В. Бахматов, А. В. Фролов, А. С. Кравченко [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : КНАГУ, 2024. – 185 с. – ISBN 978-5-7765-1562-0. – EDN EYMADF.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611244 Российская Федерация. WeldCNC : № 2023610224 : заявл. 10.01.2023 : опубл. 18.01.2023 / А. В. Фролов, П. В. Бахматов, А. С. Кравченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». – EDN KAHMIQ.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026618561 Российская Федерация. «Делитель частоты с дробным переменным коэффициентом деления» : заявл. 19.03.2026 : опубл. 26.03.2026 / А. В. Фролов, М. Д. Шинкорук ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». – EDN DUSEIC.

15. Управление драйвером шагового электродвигателя с помощью цифрового делителя частоты с переменным дробным коэффициентом деления / А. В. Фролов, А. Е. Савин, Н. С. Нестерова, С. М. Жданова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 3(75). – С. 53-62. – EDN ZMKWOC.

16. Фролов, А. В. применение модифицированного сигма-дельта модулятора для деления частоты цифровых сигналов / А. В. Фролов, А. Н. Швец, Ю. Ф. Мусихин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2025. – № 3(83). – С. 63-67. – EDN LФЗСКR.

17. Фролов, А. В. Программирование перемещения сварочной горелки при автоматизированной сварке / А. В. Фролов, К. К. Комарова // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 173-177. – EDN ONUSDK.

18. Фролов, А. В. Разработка универсальной траектории перемещения сварочной горелки при автоматизированной сварке / А. В. Фролов, А. С. Кравченко // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 178-181. – EDN PQUKOU.

19. Фролов, А. В. Универсальная двухшажная траектория перемещения сварочной горелки / А. В. Фролов, Н. Ю. Грунина // Сварочное производство. – 2023. – № 1. – С. 34-41. – EDN ZBSJLE.

20. Фролов, А. В. Установка автоматической сварки элементов судовых трубопроводов / А. В. Фролов // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2(52). – С. 91-96. – DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.057. – EDN VNPMKT. (Frolov, AV. Automatic shipboard pipeline welding machine // Marine Intellectual Technologies. 2021, Issue 2. Page 91-96. Part 2. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.057).

21. Фролов, А. В. Цифровой делитель частоты импульсных сигналов с дробным коэффициентом деления / А. В. Фролов, А. В. Боцманов, Г. Е. Шевченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 366-373. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-3-366-367. – EDN TWUBCC.