

ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Щавлев Валерий Евгеньевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОКУСИРОВКОЙ  
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ  
НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ТОКА В ПЛАЗМЕ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор Южаков А.А.

Пермь – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ	
ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ.....	12
1.1 Роль моделирования в электронно-лучевой сварке.....	13
1.2 Вторично-эмиссионные явления, сопровождающие процесс взаимодействия электронного луча с материалом.....	16
1.3 Технологические приемы в электронно-лучевой сварке.....	23
1.4 Фокусировка луча и вторичный электронный ток.....	33
1.5 Выводы по главе 1.....	44
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ	
ФОКУСИРОВКИ НА ВТОРИЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТОК	
В ПЛАЗМЕ.....	46
2.1 План проведения экспериментальных работ.....	47
2.2 Методика проведения экспериментов.....	49
2.2.1 Активное планирование эксперимента.....	49
2.2.2 Применение синхронного накопления.....	56
2.3 Результаты эксперимента.....	57
2.4 Оценка влияния процесса сканирования фокуса на форму канала проплавления.....	61
2.5 Использование полиномиальной аппроксимации для исследования формирования вторичного сигнала.....	74
2.6 Выводы по главе 2.....	79
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	
ФОКУСИРОВКОЙ.....	
3.1 Математическая модель датчика вторичного тока.....	81
3.1.1 Представление в виде ряда Фурье.....	81
3.1.2 Получение аппроксимирующего выражения ряда Фурье.....	85

3.2 Имитационная модель системы управления.....	87
3.3 Выводы по главе 3.....	92
ГЛАВА 4 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОКУСИРОВКОЙ ЛУЧА.....	94
4.1 Метод автоматического регулирования положения фокуса луча.....	94
4.2 Алгоритм работы системы.....	96
4.3 Техническая реализация.....	101
4.4 Выводы по главе 4.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108

## ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) является одним из самых высокотехнологичных методов соединения материалов, который позволяет получать изделия и детали высочайшего качества. Многие отрасли производства напрямую зависят от развития технологий сварки высококонцентрированными источниками энергии, и по мере развития техники и технологии всё больше отраслей нуждаются в обеспечении изделиями и деталями с минимальным количеством дефектов [1,2]. Поэтому задачи оптимизации процесса ЭЛС посредством использования систем автоматизированного управления являются одними из приоритетных в области сварки.

Поскольку достоверных физических моделей формирования канала проплавления и процессов, происходящих в нем, нет [3-5], поиск новых характеристик и закономерностей, сопровождающих процесс взаимодействия электронного луча с веществом, может стать отправной точкой к разработке более технологичных установок управления ЭЛС. Процессы, протекающие в точке контакта электронного луча с материалом, можно описывать с точки зрения разных научных специализаций, это гидравлика, физика плазмы, термодинамика и т.д. Сложности при моделировании возникают из-за скоротечности процессов расплавления, кристаллизации, испарения, плазмообразования, необходимости поддержания вакуума. В подобных условиях основным источником информации для исследователей являются излучения, сопровождающие ЭЛС [6-10].

Наличие данных ограничений заставляет концентрироваться на конкретных задачах при рассмотрении проблемы моделирования при ЭЛС. При этом целью при решении любой задачи является достижение более высокого качества сварного шва. Автоматизированные системы управления широко проникли в технологические процессы современного промышленного производства, и на сегодняшний день часто эффективность любой технологии напрямую зависит от степени ее автоматизации. Под эффективностью стоит понимать экономическую рентабельность, качество конечного продукта, открытость для модернизации. Технология

ЭЛС в данном аспекте не является исключением, более того особенности данного типа сварки располагают множеством предпосылок для внедрения алгоритмов регулирования и систем автоматизированного управления. Подтверждением данному факту может служить активная работа как российских, так и зарубежных специалистов в области сварки по автоматизации различных этапов процесса [11-17]. На данный момент актуальными задачами можно считать автоматическое наведение электронного луча на стык [18-20], анализ состояния сварного шва и визуализация процесса формирования соединения непосредственно во время сварки [21-24], управление формированием шва при сквозном проплаве [25,26], автоматическое регулирование положения фокуса [27,28]. Некоторые из них являются разрешенными, другие требуют доработки, но определенно можно заключить, что задача оперативного управления фокусировкой электронного луча до сих пор остается открытой [29].

Таким образом, процесс развития промышленного производства и постоянное ужесточение контроля качества продукции делает необходимым расширение областей применения ЭЛС. Подобные тенденции требуют решения задачи построения современной автоматизированной системы управления процессом формирования шва, позволяющей минимизировать зависимость качества сварного шва от субъективных факторов. Ведение исследований в данном направлении предполагает достаточно глубокое изучение механизмов и закономерностей проплавления при использовании электронного луча для обработки материалов. Изучением процессов, сопровождающих ЭЛС, занимались такие ученые как Рыкалин Н. Н. [30,31], Башенко В. В. [32,33], Зуев И. В. [30], Кайдалов А. А. [34], Ластови-ря В.Н. [35-37], Миткевич Е. А. [38], Лесков Г. И. [39], Нестеренков В. М. [39], Ланкин Ю. Н. [40], Язовских В. М. [41,42], Туричин Г. А., Акопьянц К. С. [43], Селищев С. В. [44] и др. Вопросы автоматизации процесса ЭЛС затрагиваются в работах Назаренко О. К. [45,46], Куцана Ю. Г., Лаптенка В.Д. [47-49], Мурыгина А.В. [47,49], Беленького В. Я. [50-52], Бравермана В. Я. [53,54,61], Трушников Д. Н. [55,56], Mladenov G.M. [55], Arata Y. [57], Mauer K.O. [58] и др.

Фокусировка электронного луча имеет значительное влияние на геометрические параметры сварного шва. Выбор неоптимальной точки фокусировки или ее дрейф в процессе сварки может привести к специфическим дефектам сварного шва, появлению корневых трещин и несоответствию геометрических параметров требуемым значениям, следовательно, отсутствие контроля фокусировки может привести к снижению качества сварного шва до значений, не соответствующих заявленным для технологического процесса ЭЛС. Таким образом положение фокуса напрямую связано с понятием качества сварного соединения, и решение задачи его стабилизации в процессе сварки позволит существенно повысить качество шва, позволяя при этом оптимизировать технологический процесс за счет исключения операций предварительной настройки фокуса перед началом процесса сварки.

Наиболее актуальными задачами в области автоматизации технологического процесса ЭЛС на сегодняшний день являются такие, как автоматическое наведение электронного луча на стык, анализ состояния сварного шва и визуализация процесса формирования соединения непосредственно во время сварки, управление формированием шва при сквозном проплаве, автоматическое регулирование фокусировки электронного луча. Решению последней посвящена данная работа.

Фокусировка электронного луча определяет положение его минимального сечения относительно поверхности свариваемого изделия и управляется током фокусирующей катушки электронно-лучевой установки. Фокусировка оказывает значительное воздействие на процесс формирования шва и является одним из решающих факторов, влияющих на качество сварного соединения. Даже небольшие отклонения величины тока, протекающего в фокусирующей катушке (~1-5% от максимального значения) приводят к заметным изменениям формы сварного шва. При этом существует проблема дрейфа параметров фокусировки из-за воздействия ряда факторов, одним из которых, является напыление катодного элемента электронной пушки. Процесс постоянного контроля и подстройки фокусировки во время сварки является одной из задач персонала, обслуживающего установку

ЭЛС. Известны методики предварительной настройки, использующие исследование распределения плотности пучков с помощью специальных датчиков и алгоритмов компьютерной томографии, однако применение данных методов непосредственно в процессе сварки затруднено и требует периодического прерывания процесса, что оказывает негативное влияние на качество сварных швов.

В настоящий момент в технологическом процессе ЭЛС реализованы системы, основанные на измерении вторичного электронного тока в плазме над зоной сварки, которые обеспечивают надежную работу в узком диапазоне мощностей и функционируют только при сварке статическим электронным пучком. Системы позволяют устанавливать ток фокусировки непосредственно в процессе сварки, но не работают в автоматическом режиме. За рубежом внимание к исследованиям в области ЭЛС больше всего проявляется в странах Азии, среди которых в первую очередь стоит выделить Японию. В качестве примера можно привести один из патентов, правообладателем которого является фирма Mitsubishi, в котором описываются методы, позволяющие определить фокусировку пучка на поверхности при малых мощностях перед сваркой. Однако при этом полученное значение тока фокусировки в режиме сварки требует корректировки на экспериментально подбираемые для различных материалов, толщин и типов электронно-лучевых пушек величины.

В работах Беленького В.Я. показано, что параметры вторичного электронного тока в плазме тесно связаны с процессами в канале проплавления и могут использоваться для оперативного управления фокусировкой. Известно, что зависимости вторичного электронного тока в плазме от фокусировки носят экстремальный характер. Однако полученные экстремальные зависимости определены в статическом режиме и не могут напрямую быть использованы для построения системы управления. Кроме того, для автоматизации процесса необходимо применение сканирования фокуса, влияние которого на формирование сигнала вторичного тока в плазме при ЭЛС и на качество получаемых сварных швов не исследовано.

Внедрение в технологический процесс контура автоматического регулирования фокуса луча позволит повысить эффективность процесса за счет устранения субъективного фактора и обеспечения воспроизводимости фокусировки электронного луча при сварке, что показывает актуальность темы диссертационной работы. Анализ показал, что известные подходы не обеспечивают качественного решения задачи оперативного управления фокусировкой без периодического прерывания процесса.

В соответствии с приведенными фактами, **целью** настоящей работы является разработка локальной системы автоматизированного управления фокусировкой при электронно-лучевой сварке со сканированием фокального пятна на основе анализа вторичного электронного тока в плазме.

Для достижения этой цели последовательно решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих способов и систем контроля фокусировки электронного луча при ЭЛС, а также выбор параметров излучений, сопровождающих ЭЛС, с целью выявления зависимостей, позволяющих делать выводы о параметрах процессов, протекающих в сварной ванне, и, как следствие, о текущей фокусировке электронного луча.

2. Исследование закономерностей формирования информационного сигнала высокочастотной составляющей вторичного электронного тока в плазме с учетом сканирования фокуса для использования в процессе управления фокусировкой.

3. Создание математической модели датчика вторичного тока при электронно-лучевой сварке со сканированием фокального пятна по амплитудным параметрам высокочастотной составляющей вторичного электронного тока в плазме.

4. Разработка способа управления фокусировкой электронного луча на основе анализа параметров высокочастотной составляющей вторичного электронного тока. Разработка структуры системы управления, ее реализация и внедрение.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые при анализе сигнала высокочастотной составляющей вторичного электронного тока в плазме при электронно-лучевой сварке со сканированием фокуса применен метод синхронного накопления.

2. Разработана математическая модель датчика вторичного тока, новизна которой характеризуется зависимостью первой гармоники сигнала высокочастотной составляющей вторичного электронного тока в плазме, выделяемой методом синхронного детектирования, от фокусировки электронного луча, что обеспечивает повышение точности управления фокусировкой.

3. Предложен новый способ управления фокусировкой при электронно-лучевой сварке со сканированием фокального пятна и обработкой высокочастотной составляющей вторичного электронного тока методом синхронного детектирования, обеспечивающий повышение эффективности процесса за счет устранения субъективного фактора и воспроизводимости фокусировки электронного луча при сварке.

**Практическая значимость работы** состоит в увеличении производительности установки ЭЛС и повышении качества сварных швов, получаемых при ЭЛС за счет стабилизации фокусировки электронного луча с помощью автоматизированной системы управления фокусом на основе анализа вторичного электронного тока.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках:

- конференции «Beam technologies and laser application» (г. Санкт-Петербург, октябрь 2012)

- конференции Visual-JW 2012: Международной научной конференции, посвященной проблемам визуализации в сварке. (г. Осака, 28-30 ноября 2012 г.)

- конференции «Компьютерные технологии в соединении материалов – 2015» (Тульский государственный университет, апрель 2015)

- технических семинаров кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Результаты диссертационного исследования внедрены в производственный процесс изготовления деталей ответственного назначения ОАО Пермский завод «Машиностроитель».

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 5 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, 1 работа в издании Web of science, 1 патент РФ на способ.

Диссертация включает в себя четыре главы.

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с техническим устройством установок для ЭЛС и проблемами, с которыми сталкивается оператор при управлении технологическим процессом. Приводится анализ влияния различных факторов на процесс формирования сварного шва, подходов к решению задачи оперативного контроля формы канала проплавления.

Вторая глава посвящена описанию методики проведения исследований, устройства лабораторной установки, включающей в себя стандартные и специализированные аппаратные устройства, и решения, программного обеспечения (ПО) для микроконтроллеров, пакеты прикладного ПО, с помощью которых проводилась обработка экспериментальных данных и методы математического анализа исследуемых величин.

В третьей главе описываются результаты спектрального анализа сигнала вторичного электронного тока в плазме, сопровождающего процесс сварки со сканированием фокального пятна. По результатам анализа строится математическая модель процесса, выделяются и описываются ее особенности, подтверждающие правильность гипотезы о существовании корреляции между фокусировкой и характеристиками вторичного тока.

Четвертая глава описывает процесс построения системы автоматизированного управления фокусировкой с применением датчика, работающего по принципам, описываемым математической моделью сигнала вторичного тока. Для конечной реализации модели, представленной интегральным уравнением, применяется полиномиальная аппроксимация характеристики, описывающей гармонику,

выделенную из спектра для использования в качестве информационного параметра в составе системы управления. Оцениваются параметры быстродействия системы и ее эффективность.

В приложении представлен акт внедрения результатов работы на предприятии.

## ГЛАВА 1

### АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Технологии производства с каждым годом становятся все совершеннее и сложнее [59]. При этом часто от самых передовых методов и процессов производства зависит скорость развития целых отраслей, и любые незначительные с точки зрения общих научных теорий улучшения, могут оказать огромное влияние на развитие индустрии. К одним из таких методов можно отнести электронно-лучевую сварку (ЭЛС). Наиболее широко в мире освоено промышленное применение ЭЛС в авиакосмической промышленности, ядерной энергетике, энергетическом машиностроении, турбиностроении, приборостроении, автомобильной промышленности, при массовом изготовлении подшипников, где к качеству сварных соединений отдельных узлов и изделий в целом всегда предъявлялись самые высокие требования для достижения наилучших показателей весовых и эксплуатационных характеристик.

Среди областей применения ЭЛС можно выделить следующие:

- сварка деталей из химически активных и тугоплавких металлов и сплавов;
- сварка деталей и узлов из термически упрочняемых материалов, когда нежелательна, затруднена или невозможна термическая обработка;
- сварка деталей после завершающей механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций;
- сварка толстостенных и тонкостенных конструкций ответственного назначения.

Уникальность многих конструкций, реализуемых с помощью ЭЛС, жесткие требования к функциональной надежности, а также характерные особенности процесса ЭЛС определяют повышенные требования к технологическим параметрам сварки и необходимость их оптимизации на основе расчета и управления в режиме “реального времени”.

Цель управления формированием сварного шва при ЭЛС можно сформулировать следующим образом: обеспечение гарантированного качества соединений с воспроизводимостью параметров шва при заданных режимах сварки в условиях быстропротекающего и плохо наблюдаемого многопараметрического процесса. Эта цель предполагает высокую степень изученности физической сущности процесса и требует определенного набора технических средств и технологических приемов.

### **1.1 Роль моделирования в электронно-лучевой сварке.**

Традиционные подходы определения режимов процесса ЭЛС с помощью многочисленных технологических экспериментов часто оказываются неприемлемыми с экономической стороны (особенно при отработке технологии сварки уникальных, дорогостоящих конструкций). В связи с этим оказывается целесообразной замена натуральных экспериментов моделированием на ЭВМ.

Работы по созданию компьютерных моделей процессов обработки материалов с помощью высококонцентрированных источников энергии проводятся в настоящее время в США (Ливерморская лаборатория, Центр вооружений ВМС), в Англии (Университет Эссекса), во Франции, в Китае, Германии и ряде других стран. Разработка таких моделей позволяет не только лучше понять процессы обработки концентрированными потоками энергии (КПЭ), но и создать удобный инструмент для разработки технологических процессов, подбора режимов и прогнозирования результатов обработки.

Большинство исследователей подходит к моделированию процесса ЭЛС традиционно, уделяя внимание лишь процессу теплопроводности. Однако такой подход не приводит к успеху, поскольку воздействие электронного луча не сводится исключительно к нагреву изделия, а характеризуется значительным механическим воздействием на расплав, вследствие испарения металла под лучом. Сложность и многофакторность задачи делает традиционные методы моделирования, базиру-

ющиеся на конечно-разностных или вариационно-разностных решениях, практически бесполезными.

В качестве одного из примеров модели, наиболее адекватно описывающей процессы обработки КПЭ, можно привести разработку Центра лазерных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета, исследователями которого была осуществлена разработка программного обеспечения математической модели на основе совместного решения связанных задач межфазного тепло- массообмена, гидро- и газодинамики и физики транспортировки и поглощения излучения [60]. Структура названных взаимосвязей показана на рисунке 1.1. К успеху в данном случае приводит комбинация численных методов с аналитическими решениями.

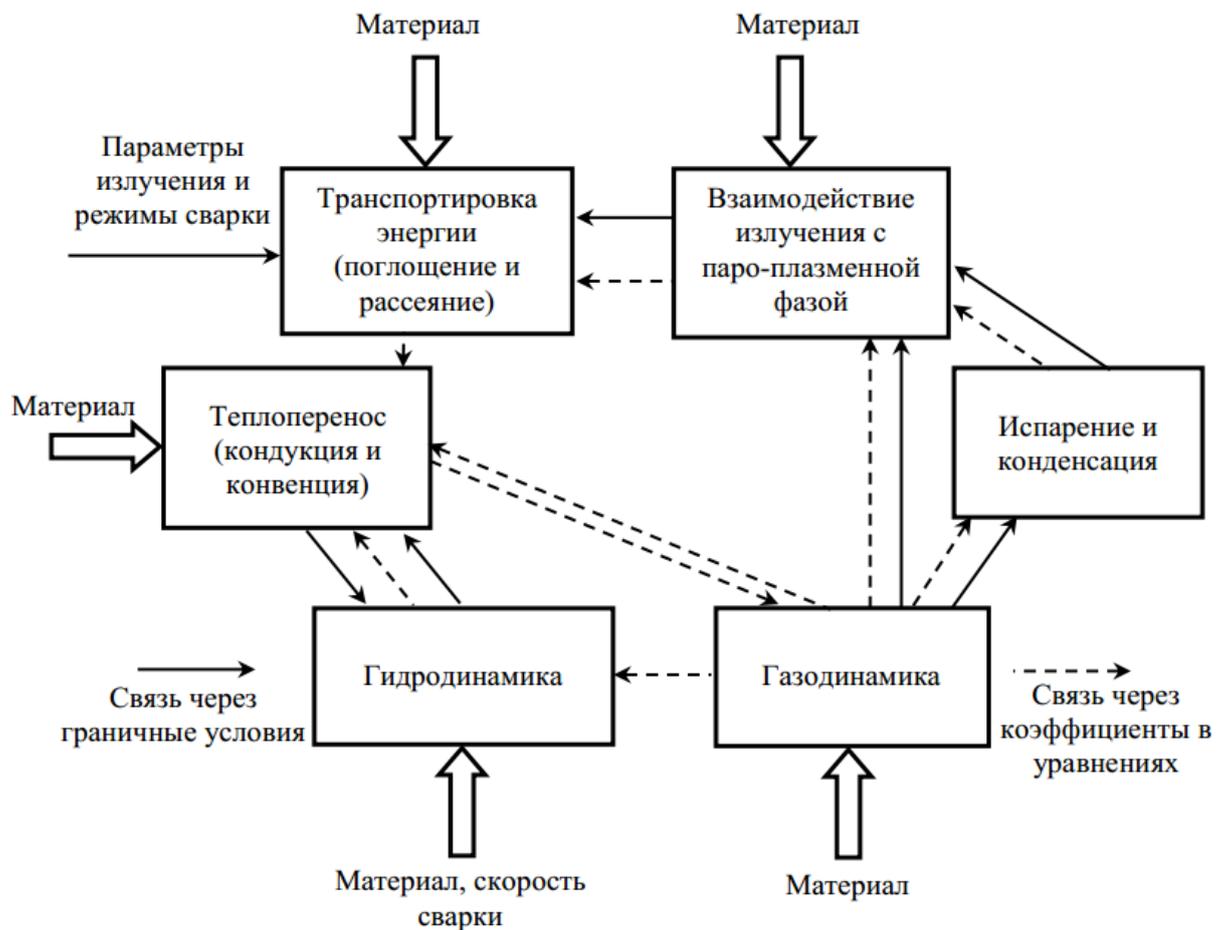


Рисунок 1.1 – Структура задачи моделирования ЭЛС [61]

Основные функции системы:

- расчет формы и размеров сварных швов, в зависимости от свойств свариваемых материалов и параметров технологических режимов;
- расчет тепловых и термических полей металла шва и околошовной зоны;
- расчет химического состава металла шва с учетом испарения легирующих компонентов;
- расчет параметров эквивалентного теплового источника, обеспечивающего такую же форму проплавления, как и истинное лучевое воздействие;
- подбор оптимальных режимов сварки;

В дальнейшем особое внимание планируется уделить разработке динамических моделей, пригодных для управления ЭЛС в режиме «реального времени» и разработке моделей для прогнозирования химического состава зоны сварного соединения.

Наличие адекватных математических моделей процесса ЭЛС имеет большое значение для теории сварочных процессов и практического применения, однако сложность и многофакторность этого вида сварки оставляет многие задачи обеспечения требуемого качества сварного шва для решения непосредственно в процессе сварки с помощью специальных технических средств управления формированием сварного шва. К таким задачам относятся обеспечение точного позиционирования электронного луча по стыку свариваемых деталей, стабилизация глубины проплавления, управление уровнем фокусировки луча, управление энергетическими параметрами источника питания электронно-лучевой пушки. При этом целесообразно, в качестве информационных сигналов использовать явления, сопутствующие процессу сварки. Но поскольку вычислительная мощность микропроцессоров для локальных систем управления ограничена, имеет смысл сосредоточиться на анализе отдельных параметров для решения конкретной задачи, а не построении комплексной модели. Для этого нужно проанализировать особенности явлений, сопутствующих ЭЛС.

## 1.2 Вторично-эмиссионные явления, сопровождающие процесс взаимодействия электронного луча с материалом

ЭЛС сопровождается рядом сопутствующих или вторичных излучений, которые в той или иной степени характеризуют процесс сварки и представляют интерес для контроля процесса и автоматического регулирования с обратной связью по качеству и геометрии сварного шва. Это излучения в инфракрасном, световом, радио-, СВЧ, рентгеновском диапазонах, возникновение отраженных, вторичных и тепловых электронов, положительно-заряженных ионов (рисунок 1.2).

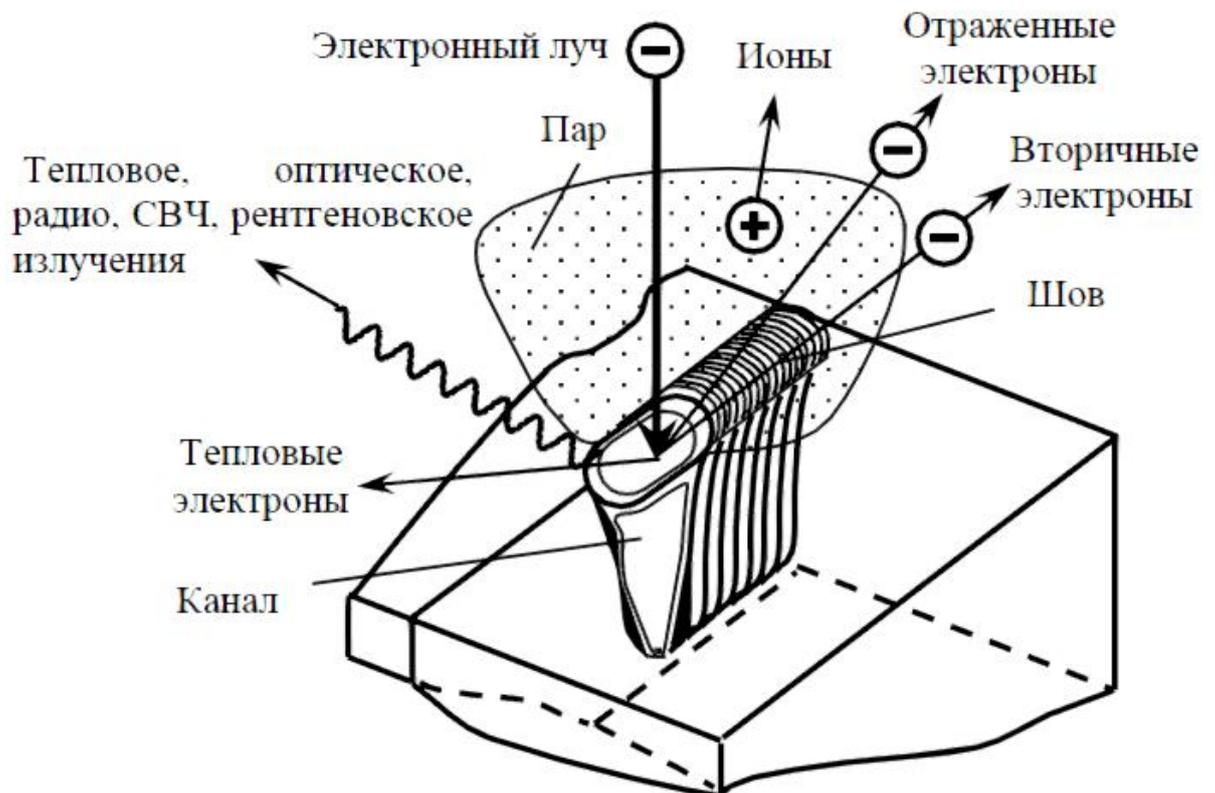


Рисунок 1.2 – Виды излучений, сопровождающих процесс ЭЛС [61]

Рентгеновское и тепловое излучения несут непосредственную информацию о состоянии поверхности сварочной ванны, а радио- и СВЧ-излучения – об электромагнитных процессах в канале и, следовательно, косвенную, усредненную информацию о поведении сварочной ванны.

Прием радио- и СВЧ-излучения из зоны сварки осуществляется антеннами, защищенными от попадания на них вторично-эмиссионных частиц. Исследования показали [62,63], что интенсивность этих излучений хорошо коррелируется с уровнем фокусировки электронного луча. Других четких взаимосвязей с процессом сварки не обнаружено.

Все излучения, кроме рентгеновского, имеют узкую диаграмму направленности, обусловленную формой канала. При регистрации таких излучений практически невозможно выделить сигнал от определенной точки поверхности канала. Суперпозиция в момент приема датчиками излучений от разных точек ванны и происшедших в разное время приводит к неопределенности регистрируемого сигнала, т. е. к его усреднению по поверхности расплава и объему канала [64].

На практике реализован метод спектрографического контроля глубины несквозного проплавления по ионизационному свечению паров [65]. Способ осуществляется за счет введения в зону будущего шва двух маркирующих веществ на двух различных уровнях, между которыми должен находиться корень шва. Система автоматического управления процессом сварки построена так, чтобы обеспечить наличие в парах над сварочной ванной маркирующего вещества из первого уровня, а появление вещества со второго уровня допускается только кратковременно.

Так как формирование сварочной ванны определяется в основном механическим воздействием на поверхность расплава испаряющихся атомов материала, то динамические, статические и усредненные параметры парового потока наиболее полно характеризуют процесс развития и существования сварочной ванны. Поскольку оперативная регистрация указанных параметров пара практически невозможна, то обычно измеряются характеристики потока вторично-эмиссионных заряженных частиц – электронов и ионов, возникающих при ионизации пара электронным пучком и сохраняющих определенную информацию о состоянии поверхности канала в сварочной ванне. Для приема вторично-эмиссионных заряженных частиц применяют кольцевые металлические пластины (коллекторы),

устанавливаемые соосно с электронным пучком над сварочной ванной. Разделение вторичных электронов и ионов осуществляется подачей на коллектор соответственно положительного или отрицательного смещения – напряжения, равного 80 – 200 В. При анализе сигналов коллекторов вторичной эмиссии выделяют амплитуды постоянной и переменной составляющих.

Исследования эмиссионных сигналов показали, что четкая взаимосвязь этих сигналов с качеством сварного шва отсутствует [66]. Лишь в ряде случаев при сварке сталей отмечается соответствие аномальных всплесков амплитуды колебания ионного тока и образование полостей в объеме шва [67]. Однако широкого практического применения для контроля и управления процессом сварки этот факт не получил.

Наиболее практически значимым результатом этих исследований является установление зависимости от уровня фокусировки электронного луча мощностью до 5 кВт частоты перехода через нуль амплитуды переменной составляющей как ионного, так и электронного токов вторичной эмиссии [68].

Частотный анализ пульсаций ионного тока показывает, что при сравнительно малых мощностях электронного луча имеют место почти гармонические колебания. При увеличении мощности частотный спектр расширяется, появляются другие гармоники, а при глубине проплавления свыше 30 мм частотный спектр становится шумовым.

Исследование частотных характеристик вторичных эмиссионных токов при ЭЛС указывает на возможность использования этих характеристик для контроля процесса сварки. Так, частота пульсаций парового потока, истекающего из канала проплавления, или частота пульсаций ионного или вторично-эмиссионного токов коррелируют с глубиной проплавления и со степенью фокусировки [69].

Для регистрации тока вторичных заряженных частиц используют обычно кольцевые металлические электроды-коллекторы, устанавливаемые над зоной сварки соосно с электронным пучком и прикрепленные на изоляторах к нижнему торцу электронной пушки (рисунок 1.3, а). Кроме этого самого распростра-

ненного варианта в патентных источниках можно найти значительное количество модификаций коллекторов, некоторые из них будут рассмотрены ниже. Дело в том, что в условиях ЭЛС пары металла ионизируются и возникающие в плазме заряженные частицы тоже могут регистрироваться коллектором. Например, для ограничения тока истинно вторичных электронов на коллекторе создают отрицательный потенциал величиной 50–200 В. Для регистрации вторичного ионного тока используют коллектор закрытого типа, расположив перед ним металлический заземленный экран (рисунок 1.3, б), а для измерения только быстрых отраженных электронов перед коллектором размещают сетку, имеющую положительный потенциал, или диафрагму с малым отверстием. Чтобы получить сигналы, несущие информацию о симметрии входного отверстия канала проплавления, коллектор разделяют на изолированные секторы радиальными разрезами и анализируют сигналы, полученные от каждого сектора. На рисунке 1.3, в показан коллектор типа цилиндра Фарадея, принимающий отраженные и истинно вторичные электроны с малого пространственного угла.

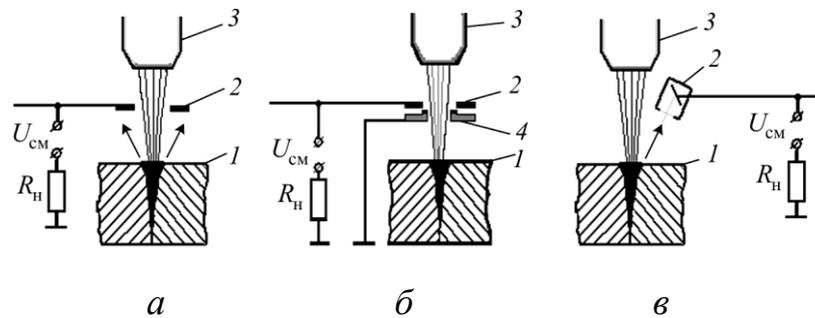


Рисунок 1.3 – Регистрация вторично-эмиссионных сигналов из зоны взаимодействия электронного пучка с металлом: 1 – свариваемое изделие; 2 – коллектор заряженных частиц; 3 – электронная пушка; 4 – заземленный экранирующий электрод;  $U_{см}$  – напряжение смещения, задающее потенциал коллектора;  $R_{н}$  – сопротивление нагрузки для регистрации сигнала

Большинство усилий исследователей направлено на поиск вторично-эмиссионных сигналов, несущих информацию о процессах в канале проплавления и позволяющих управлять геометрическими параметрами сварного шва. Однако полученные к настоящему времени данные относятся к ограниченным

условиям протекания процесса ЭЛС, в частности для мощности электронного пучка, не превышающей 5–6 кВт, и обобщение результатов представляет определенную трудность, а иногда выводы и рекомендации этих исследований противоречат друг другу.

Некоторую информацию о форме канала проплавления можно получить анализируя параметры электронного луча. Одним из наиболее распространенных приспособлений для измерения радиального распределения интенсивности пучка является цилиндр Фарадея. На рисунке 1.4 представлена система, в составе которой применяется этот тип датчика.

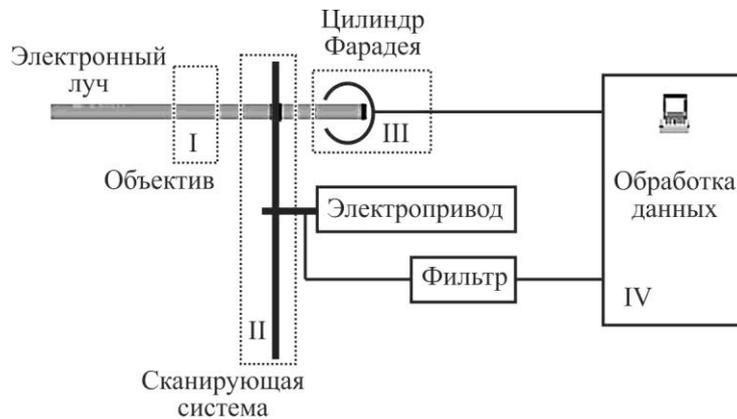


Рисунок 1.4. Блок-схема измерения радиального распределения интенсивности пучка: I – объектив (как правило, часть пушки); II – сканирующее (модуляционное) устройство; III – цилиндр Фарадея и IV – блок обработки данных и дисплей

Узел сбора данных обычно состоит из: а) сканирующего зонда; б) отверстия в тугоплавкой пластине; в) диска, содержащего щель, и позволяет измерять проходящую или поглощенную часть пучка с помощью коллектора, цилиндра Фарадея и т.п. При измерении параметров интенсивных пучков (значения мощности сварочных пучков превышают 1 кВт и достигают десятков или даже 100–120 кВт) пучок имеет энергию, достаточную для разрушения большинства датчиков коллекторов тока, размещенных на пути пучка. В связи с этим датчик облучается сравнительно небольшой порцией всего тока пучка и в течение малого отрезка времени.

В случае возможности вращения пучка по кругу отличное решение – это использование цилиндра Фарадея, на входе которого имеется диск с радиальными щелями (рисунок 1.5). При этой технике измеряют интегрированный ток, прошедший через щели и проекции плотности тока пучка, получаемые после пересечения всех щелей, расположенных под равными углами около оси пучка. Одна из щелей имеет отличающуюся от остальных ширину, или расстояние до соседних щелей. Это делается для того, чтобы в результате измерений была понятна ориентация измерительного устройства (а значит, и полученного распределения) по отношению к технологической камере.

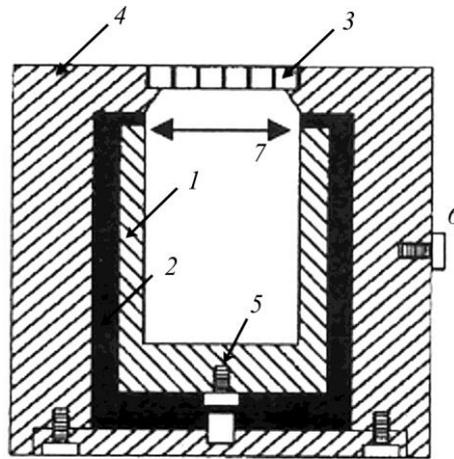


Рисунок 1.5. Модифицированный цилиндр Фарадея с тугоплавким диском на входе для отбора проекции плотности тока пучка:

1 – цилиндр Фарадея; 2 – изолятор; 3 – тугоплавкий, отбирающий ток диск с радиальными щелями; 4 – корпус измерительного устройства; 5 – исходный контакт для снятия сигнала; 6 – винт земли; 7 – внутренний диаметр цилиндра Фарадея

Стенки щелей могут быть сделаны с двухсторонним наклоном  $5^\circ$  к вертикальной плоскости (рисунок 1.6). Рисунок 1.7 представляет позиции точек в частотной области, в которых сигнал подвергается обратному преобразованию Фурье в пространственную область аппроксимации сигнала.

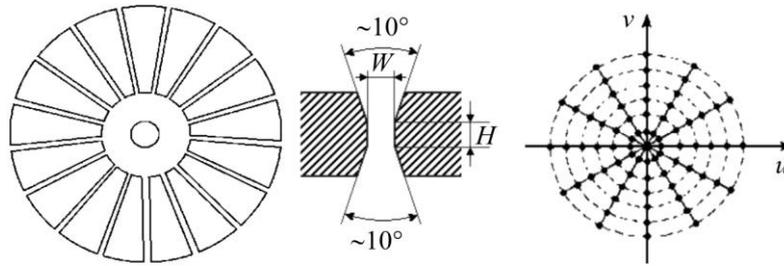


Рисунок 1.6. Диск из вольфрама с радиальными щелями и поперечное сечение одной щели

Рисунок 1.7. Точки в частотной области, в которых выполняется обратное преобразование Фурье

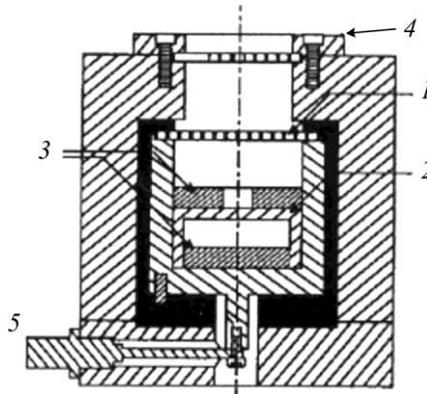


Рисунок 1.8. Модифицированный цилиндр Фарадея: 1 – дополнительный экран для улавливания отраженных электронов со стенок более широкой щели; 2 – второй цилиндр Фарадея для калибровки (измерение всего тока пучка при центровке прибора с пучком); 3 – углеродный диск для минимизации обратно отраженных и вторичных электронов и улучшение термической стабильности; 4 – фланец для прижатия тугоплавкого входного диска; 5 – контакт для снятия сигнала



Рисунок 1.9. Устройство для измерения профиля пучка. Входной диск имеет 7 щелей

Модифицированный цилиндр Фарадея, предложенный в работах [70, 71] для более точного измерения профиля пучка, без погрешностей, вносимых вторичными электронами, показан на рисунке 1.8, 1.9. Томографская техника реконструирова-

ния широко используется во многих научных областях, включая медицину и исследование материалов. Для этих областей разработаны подходящие программные продукты.

Задача построения системы управления обязательно включает в себя такие этапы как поиск информационного параметра и поиск способа воздействия на процесс, оказывающего заметное влияние на исследуемый параметр с целью получения обратной связи. Явления, сопровождающие процесс взаимодействия электронного луча с изделием, следует использовать в качестве информационных параметров, для поиска способов воздействия на процесс рассмотрим основные технологические приемы, применяемые в ЭЛС для повышения качества швов.

### **1.3 Технологические приемы в электронно-лучевой сварке**

Качество шва при электронно-лучевой сварке, как и при любом способе сварки плавлением, определяется совокупностью заданных технологических и энергетических параметров процесса. Неправильный выбор способа сварки, режима или нарушение оптимального режима электронно-лучевой сварки приводят к появлению дефектов в швах даже на хорошо свариваемых материалах. Поэтому знание арсенала технологических приемов и их областей применения является необходимым квалификационным требованием при работе с ЭЛС.

Целью выбора технологических приемов сварки электронным пучком должна быть не только минимальная стоимость процесса, но и то, чтобы эта технологическая операция была финишной, сборочной.

Далее необходимо классифицировать технологические приемы сварки и ремонта швов электронным пучком. По степени изученности и применяемости известные технологические приемы сварки можно разделить на три группы.

К первой относятся наиболее изученные и широко применяемые в промышленности приемы: развертка и наклон электронного пучка; модуляция тока электронного пучка; подача присадочного материала; применение подкладок; сварка

смещенным и расщепленным электронным пучком; выполнение прихваток, предварительных и "косметических" проходов; сварка секциями.

Вторая группа включает приемы, хорошо изученные в лабораторных условиях, но не получившие пока практического применения: "тандемная" сварка; сварка в узкий зазор; сварка "пробковыми" швами.

В третью группу входят приемы, целесообразность, или возможность реализации которых недостаточно обоснована: оплавление корневой части шва "проникающим" электронным пучком; осцилляция уровня фокусировки электронного пучка; применение флюсов; сварка с использованием широкой вставки; сварка с дополнительным теплоотводом; двухсторонняя сварка; вибрация свариваемого изделия; ввод ультразвуковых колебаний в сварочную ванну.

По типам физического воздействия технологические приемы делят на четыре группы: управление пространственно-энергетическими параметрами электронного пучка (периодическое и статическое отклонение, модуляция токов электронного пучка и фокусирующей линзы); применение дополнительных конструктивных элементов и материалов (подкладки, вставки, накладки, наплавки, теплоотводящие элементы, присадки, флюсы); специальные сварные швы (дополнительные проходы, прерывистые швы, дополняющие швы); механическое воздействие на сварочную ванну (вибрация изделия, ввод ультразвуковых колебаний)\*.

Вспомогательные операции. Прихватки на стыке целесообразно выполнять с помощью электронного пучка (особенно для ферромагнитных материалов), так как дуговая сварка в этом случае приводит к намагничиванию изделия. Порядок наложения прихваток вдоль стыка - от середины к краям. Количество прихваток определяется конструкцией свариваемого изделия. Длина прихватки обычно не должна превышать 20-30 мм, чтобы обеспечивать надежную работу системы слежения за стыком.

---

\* классификация приведена согласно информации из статьи «Технологические приемы электронно-лучевой сварки», размещенной на официальном сайте ООО НПФ «Ганза» – [http://www.ganza-ua.com.ua/articles/technology\\_06.htm](http://www.ganza-ua.com.ua/articles/technology_06.htm)

С целью уменьшения газонасыщенности и концентрации неметаллических примесей в зоне сварки иногда выполняют вначале "неполную" сварку (предварительный проход) с глубиной проплавления, меньше требуемой глубины шва. Возможно применение и нескольких таких проходов с последовательным увеличением глубины проплавления.

Основные приемы. К числу наиболее изученных и распространенных приемов сварки относятся следующие: полное проплавление, развертка и наклон электронного пучка, сварка с присадкой, сварка с подкладкой, сварка смещенным и расщепленным электронным пучком, модуляция тока электронного пучка.

Полное проплавление позволяет исключить корневые дефекты, свести к минимуму угловые деформации и вероятность появления пор и раковин.

Для технологической развертки электронного пучка наиболее эффективны такие типы траекторий: окружность, эллипс, дуга (продольная и поперечная). Формирование при развертке усредненного распределения плотности мощности электронного пучка поперек направления сварки с "провалом" в приосевой области уменьшает амплитуду корневых пиков и расширяет корень сварного шва. При радиусе закругления корня сварного шва 1-1,5 мм (для глубины проплавления 10-80 мм) и 2-4 мм (для глубины проплавления 100-200 мм) вероятность появления корневых дефектов минимальная. Двойное преломление электронного пучка при развертке позволяет существенно увеличить угол его отклонения относительно оси по сравнению с однократным преломлением при сохранении той же ширины сварного шва в его верхней части. Частоту развертки электронного пучка рекомендуют выбирать в диапазоне 100-500 Гц для сталей и 500-1000 Гц для алюминиевых и титановых сплавов. Поперечные размеры траектории развертки оптимальны в диапазоне 1-1,5 мм. Скорость движения электронного пучка вдоль траектории развертки желательно поддерживать постоянной: 600-800 мм/с для сталей и 2000-2500 мм/с для алюминиевых и титановых сплавов.

Сварка двумя электронными пучками (танемом) листовых металлов толщиной больше 10 мм позволяет резко (в 5-7 раз) повысить скорость сварки при уве-

личении общей мощности источников сварочного нагрева на 20-25%. При этом достигается лучшее качество сварного шва.

Постоянный наклон при сварке электронного пучка в направлении его перемещения по изделию на угол  $5-7^\circ$  (но иногда и до  $20^\circ$ ) предотвращает S-образную форму фронта кристаллизации сварочной ванны и тем самым резко снижает пористость и вероятность возникновения раковин, а также исключает бугристость сварного шва.

Сварку с присадкой используют для предотвращения неполномерности шва (при больших зазорах в стыке) или поддержания в металле заданной концентрации легко испаряемых элементов. В качестве присадки применяют в основном проволоку диаметром 0,8-1,2 мм, подаваемую в сварочную ванну позади электронного пучка под углом  $15-45^\circ$  к его оси или укладываемую на стык перед зоной сварки.

При сварке на подкладке обеспечивается выведение корневых дефектов из несущей части соединения, причем подкладка может быть как удаляемой, так и неудаляемой. Для улучшения выхода газов и паров из сварочной ванны и снижения трудоемкости удаления можно использовать подкладку в виде гранул или рубленой сварочной проволоки. С помощью подкладки из керамики можно добиться исключения финишной обработки корня шва.

При сварке разнородных металлов электронный пучок смещают в сторону более тугоплавкого металла, а при сварке-пайке - в сторону менее тугоплавкого металла. Смещение электронного пучка применяют и для компенсации его отклонения от стыка продольной составляющей магнитного поля, возникающего при сварке разнородных материалов.

Используя импульсное знакопеременное отклонение электронного пучка, можно одновременно сваривать отдельными точками или непрерывными швами два или более близко расположенных стыка на тонколистовых (до 3 мм) материалах.

Для уменьшения тепловложения при сварке малогабаритных тонкостенных изделий и для выполнения точечной сварки используют импульсную модуляцию тока электронного пучка с частотой до 400 Гц.

Для расширения номенклатуры марок материалов, свариваемых с помощью электронного пучка, применяют электронно-лучевую наплавку и электронно-лучевое оплавление стыкуемых поверхностей. На поверхности деталей со стороны будущего сварного соединения наплавляют слои хорошо свариваемого материала толщиной до 10 мм, которые и сваривают после механической обработки. Оплавлением с помощью быстросканирующего электронного пучка стыкуемых поверхностей на глубину 4-8 мм достигается рафинирование исходного материала в зоне будущего сварного шва и, тем самым, значительно снижается или исключается дефектность (прежде всего пористость) шва.

Предотвращение корневых дефектов при сварке с двойным преломлением электронного пучка. Данный прием предназначен для получения сварных швов с параллельными боковыми границами и широким корнем.

Сварку проводят повторяющимися циклами, состоящими из трех этапов. Вначале сварку осуществляют не отклоненным электронным пучком, а затем - при поочередном его отклонении с помощью двойного преломления вперед и назад по отношению к направлению перемещения зоны сварки. Этап сварки с отклонением электронного пучка производится вначале с направлением электронного пучка на новое дно сварочной ванны и последующим плавным перемещением его на переднюю верхнюю кромку ванны, затем с выбросом электронного пучка на заднюю верхнюю кромку ванны и последующим плавным перемещением его на дно ванны. Одновременно осуществляют сканирование электронного пучка по траектории, являющейся дугой окружности или эллипса и обращенной выпуклостью в сторону отклонения электронного пучка, что и позволяет получить сварочную ванну цилиндрической формы. Время сварки не отклоненным электронным пучком определяют так, чтобы, перемещаясь со скоростью сварки  $V_{св}$ , пучок

проходил расстояние, равное радиусу  $R_e$  своего поперечного сечения на уровне свариваемых изделий:  $t_1 = R_e/V_{св}$ .

Суммарное время отклонения  $t_2$  в переднюю и хвостовую части ванны выбирают равным или меньше времени затекания пародинамического канала в сварочной ванне.

Операции, выполняемые электронным пучком, направлены на то, чтобы создать сварочную ванну цилиндрической формы с круговым или эллиптическим сечением с помощью расплавления той части металла, которая составляет разницу между конической и цилиндрической формами ванны с равными сечениями на верхнем уровне. Такое дополнительное расплавление осуществляют увеличением угла встречи электронного пучка с передней или задней стенкой пародинамического канала в сварочной ванне по сравнению с предыдущим равновесным состоянием.

Вначале электронный пучок отклоняют на дно сварочной ванны и с увеличивающейся скоростью (так как уменьшается толщина слоя металла между конической и цилиндрической формами ванны) перемещают на переднюю верхнюю кромку ванны. Затем электронный пучок перебрасывают на заднюю верхнюю кромку сварочной ванны и с уменьшающейся скоростью опускают на ее дно. Такой порядок отклонения электронного пучка сохраняет существующее при обычной сварке направление переноса расплавленного металла.

Разработанный прием электроннолучевой сварки позволяет максимально снизить вероятность образования корневых и других дефектов и получить шов с высоким качеством при минимальных деформациях свариваемого изделия.

Стыковая сварка разнородных металлов. Обычно для стыковой сварки разнородных металлов характерно смещение электронного пучка в сторону более тугоплавкого металла (собственно сварка) или в сторону более легкоплавкого металла (сварка-пайка). При этом сложно выполнять слежение за стыком.

Для осуществления сварки с точным ведением электронного пучка по линии стыка разработан технологический прием сварки с импульсно-точечной разверт-

кой, при котором ось электронно-оптической системы электронной пушки, ось развертки и плоскость стыка совмещены.

Движение электронного пучка начинается из точки N, например, влево от оси X по траектории 1. Переместившись с заданной скоростью сканирования  $V_{ск}$  на расстояние  $2R_e$  до точки A, электронный пучок мгновенно перебрасывается по траектории 2 в симметричное относительно оси X положение (точку B) на заданном контуре. Далее электронный пучок снова перемещается со скоростью  $V_{ск}$  на расстояние  $2R_e$  (до точки C), а затем перебрасывается в симметричное положение (точку D). Далее процесс движения электронного пучка повторяется до тех пор, пока электронный пучок не достигнет конечной точки K заданного контура, после чего электронный пучок мгновенно перебрасывается в начальную точку N. Таким образом, осуществляется одновременное формирование зон нагрева на обеих половинах заданной траектории сканирования электронного пучка, симметричных относительно плоскости симметрии сварочной ванны.

Зоны нагрева между точками A и D, N и B, C и F формируются практически непрерывно, так как поперечные сечения электронного пучка соприкасаются при выбранном периоде его переброса  $T = 4R_e/V_{ск}$ . При меньшем периоде "следы" поперечного сечения электронного пучка будут перекрываться, обеспечивая еще большую равномерность нагрева свариваемого металла. Следовательно, период всегда выбирают из условия  $T \leq 4R_e/V_{ск}$ . Для формирования симметричного нагрева металла на обеих половинах заданной траектории сканирования при сварке однородных металлов необходимо, чтобы время пребывания электронного пучка в каждом из отклоненных положений было одинаковым, т. е. равным  $T/2$ .

При сварке разнородных материалов соотношение времен пребывания электронного пучка в каждом из отклоненных положений определяют соотношением количества теплоты, необходимой для расплавления каждого из металлов.

При этом для обеспечения непрерывности формирования зон нагрева необходимо, чтобы время паузы на более легкоплавком металле, которое равно време-

ни пребывания электронного пучка в отклоненном положении на более тугоплавком металле, не превышало  $2R_e/V_{ск}$ .

Одновременное формирование симметричных относительно направления сварки зон нагрева на заданной траектории сканирования обеспечивает симметричный отток расплавленного металла от мест непосредственного воздействия электронного пучка. Поскольку перенос расплава происходит в направлении, обратном направлению перемещения электронного пучка, то при движении пучка от точки N к точке K и создается поток расплава, имеющий то же направление, что и при сварке не отклоненным электронным пучком. Таким образом, при сварке разнородных металлов обеспечивается симметричное движение расплава в сварочной ванне, повышается ее устойчивость и тем самым уменьшается вероятность образования дефектов сварного шва гидродинамического характера, а также обеспечивается возможность работы системы слежения за стыком.

Сканирование фокуса электронного пучка. В этом хорошо известном технологическом приеме нужно лишь отметить эффект нелинейности колебаний фокуса, который часто не учитывают пользователи.

Колебания уровня фокусировки электронного пучка относительно некоторого среднего значения осуществляются модуляцией тока электромагнитной линзы.

Простая синусоидальная модуляция тока линзы приводит к намного более сложному закону колебания уровня фокусировки электронного пучка. Это обусловлено нелинейными свойствами электромагнитной линзы как преобразователя колебаний тока в колебания фокуса электронного пучка. В спектре колебаний расстояния  $b$  появляется бесконечное число гармоник с частотами, кратными основной частоте модуляции, и с амплитудами, убывающими с увеличением номера.

Лишь при малой амплитуде модуляции продольные колебания минимального сечения электронного пучка близки по форме и частоте к модулирующим ток линзы, но сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ . Нелинейность линзы приводит и к появле-

нию постоянной составляющей в колебаниях уровня фокусировки. Тем самым нарушается статическая фокусировка электронного пучка.

Начало и окончание шва. Плавное начало и окончание шва с постоянной скоростью сварки. При несквозном и сквозном проплавлении металлов толщиной до 60 мм предотвращение возникновения внешних дефектов достигается при плавном нарастании или спаде мощности электронного пучка на длине стыка, превышающей глубину шва не менее чем в два раза. Поскольку геометрия и качество шва сильно зависят от уровня фокусировки электронного пучка по отношению к глубине проплавления, то при изменении мощности электронного пучка в начале и конце сварки необходимо, по крайней мере, поддерживать постоянным расстояние между минимальным поперечным сечением электронного пучка и дном сварочной ванны. Если распределение плотности мощности электронного пучка не обеспечивает предотвращение корневых дефектов, то минимальное сечение электронного пучка в процессе изменения его мощности необходимо удалять от корня проплавления. При этих операциях нужно учитывать, что регулирование мощности изменяет положение минимального сечения электронного пучка из-за проявления магнитного пинч-эффекта. В случае применения развертки электронного пучка параметры ее необходимо изменять в зависимости от мощности пучка.

Плавное окончание шва с переменной скоростью сварки. Для сокращения длины участка окончания шва следует одновременно с плавным уменьшением мощности электронного пучка плавно уменьшать скорость сварки до нуля. Это позволяет снизить перегрев свариваемых деталей при перекрытии замкнутого шва небольшой длины и предотвратить возможное разупрочнение зоны термического влияния.

Такой способ реализован при сварке со сквозным проплавлением. С помощью системы автоматического регулирования поддерживается постоянное значение сквозного тока электронного пучка на участке окончания шва до тех пор,

пока скорость сварки не станет равной нулю. Затем мощность электронного пучка быстро уменьшают до нуля.

Для сварки сталей толщиной  $>100$  мм разработан прием окончания шва с линейным увеличением в 2,1 раза скорости сварки (мощность электронного пучка уменьшается линейно) и кусочно-линейным изменением положения фокуса электронного пучка. Такое изменение  $V_{св}$  в данном случае связано с тем, что оптимальная скорость сварки увеличивается с уменьшением глубины проплавления.

Начало и окончание шва при нулевой скорости сварки. При сварке толстолистовых металлов электронный пучок можно включать и/или выключать при попадании его в отверстие на стыке. Отверстие выполняют предварительно либо электронным пучком повышенной мощности, либо механически. После сварки основного участка стыка отверстие заполняют в нижнем положении с помощью присадочного материала в виде сплошной или рубленой проволоки, расплавляемой сканирующим по окружности электронным пучком мощностью 5-7,5 кВт. Описанный прием можно применять и при сварке металлов средних толщин.

Возможно также плавное (во времени) окончание шва при нулевой скорости сварки без предварительно подготовленного отверстия и подачи присадочного материала. Такой прием эффективен при сварке титановых сплавов.

Приемы ремонта сварного шва. Широкое применение электронно-лучевой сварки для соединения толстолистовых металлов повлекло за собой и развитие способов ремонта шва, так как вероятность возникновения дефектов с ростом глубины проплавления увеличивается. Разработано несколько приемов устранения как внешних, так и внутренних дефектов сварного шва.

"Косметические" проходы электронным пучком пониженной мощности выполняют для устранения неровностей на поверхности шва (как с лицевой, так и с обратной сторон), небольших кратеров и подрезов. Иногда этот прием используют с целью термообработки сварного соединения. В ряде случаев проходы выполняют с подачей цельной присадочной проволоки (в любом пространственном положении) либо рубленой (в нижнем положении). Наименьшая вероятность об-

разования корневых дефектов обеспечивается при использовании поперечной пилообразной развертки или сильно расфокусированного электронного пучка. При этом достигается и весьма гладкая поверхность оплавленного шва, особенно на титановых сплавах.

Таким образом, на сегодняшний день существует множество различных методов и приемов, позволяющих без серьезных модификаций установок получать более качественные сварные швы. Но стоит обратить внимание на то, что среди перечисленных техник имеются недостаточно изученные и обоснованные для применения в технологическом процессе. В рамках данной работы выделяются такие приемы как сканирование фокуса и постоянный анализ вторичного излучения электронов с целью определения положения фокуса электронного луча и стабилизации выбранного режима с помощью системы управления, которую предстоит разработать по результатам исследований. Далее необходимо рассмотреть существующие технические решения и разработки, позволяющие осуществлять управление параметрами электронного пучка, в том числе фокусировкой.

#### **1.4 Фокусировка луча и вторичный электронный ток.**

Большинство усилий исследователей направлено на поиск вторично-эмиссионных сигналов, несущих информацию о процессах в канале проплавления и позволяющих управлять геометрическими параметрами сварного шва. Однако полученные к настоящему времени данные относятся к ограниченным условиям протекания процесса ЭЛС, в частности для мощности электронного пучка, не превышающей 5–6 кВт, и обобщение результатов представляет определенную трудность, а иногда выводы и рекомендации этих исследований противоречат друг другу.

В процессе сварки электронный луч может выполнять как рабочую, так и вспомогательную функции. Первая связана с процессами изменения агрегатного состояния материалов и собственно формированием соединения, вторая – с взаи-

модействием луча со стенками и расплавленным содержимым сварочной ванны, сопровождающимся отражением электронов и другими излучениями, являющимися следствием реакций, протекающих при контакте луча с материалом. Исследование характера данных вторичных явлений логично сопровождать операциями сканирования – для достижения этой цели сварка ведется не статичным лучом, а осциллирующим по определенной траектории и с определенной скоростью. Поскольку первоочередной задачей данного исследования является поиск оптимального положения фокуса луча, то процесс сопровождается сканированием точки фокусировки луча в вертикальной плоскости.

Таким образом, в ходе анализа излучений, сопровождающих процесс ЭЛС, и технологических приемов, используемых для улучшения параметров сварного шва, выбрано направление для исследований, которое включает в себя измерение вторичного электронного тока для установления текущего положения фокуса с применением технологического приема сканирования фокуса для выявления режима острой фокусировки. Стоит отметить взаимосвязь терминов режим фокусировки и положение фокуса – в зависимости от положения точки фокуса луча относительно поверхности свариваемого изделия в вертикальной плоскости принято говорить о недофокусированном режиме, когда точка фокуса находится за пределами канала проплавления, перефокусированный режим – фокус значительно ниже поверхности свариваемого изделия, режим острой фокусировки – фокус около поверхности, для последнего часто характерна максимальная глубина проплавления. Далее будут рассмотрены работы, связанные с задачей управления фокусировкой луча.

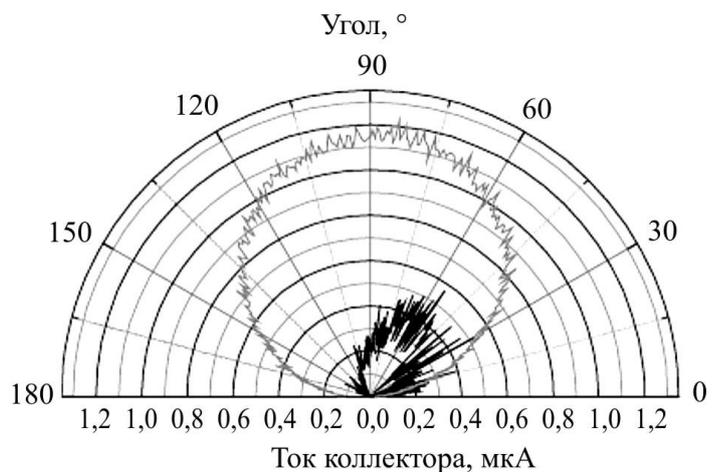


Рисунок 1.10 – Угловое распределение отраженных электронов для остро сфокусированного (черный цвет диаграммы) и расфокусированного (серый цвет диаграммы)

На рисунке 1.10 показано угловое распределение отраженных электронов [72], измеренное в плоскости симметрии сварочной ванны при остро сфокусированном и расфокусированном электронном пучке. Измерения проводились датчиком типа цилиндра Фарадея при токе электронного пучка 30 мА и ускоряющем напряжении 60 кВ. Измерения показали, что для расфокусированного электронного пучка имеет место распределение электронов по закону косинуса, а для остро сфокусированного пучка наблюдается более узкое угловое распределение (похожее на  $\cos^3\varphi$ ) с максимумом, смещенным в сторону, обратную направлению скорости сварки. Последнее связано с тем, что задний фронт канала проплавления открыт более широко, чем передний.

При анализе тока коллектора вторично-эмиссионных сигналов выделяют амплитуду постоянной и переменной составляющих, частоты этих колебаний и др. В работе [73] измерена постоянная составляющая коллекторного тока при использовании коллектора типа цилиндра Фарадея, установленного под углом  $30^\circ$  по отношению нормали к поверхности свариваемого изделия на расстоянии около 150 мм от зоны взаимодействия электронного пучка с металлом. На рисунке 1.11 приведены зависимости

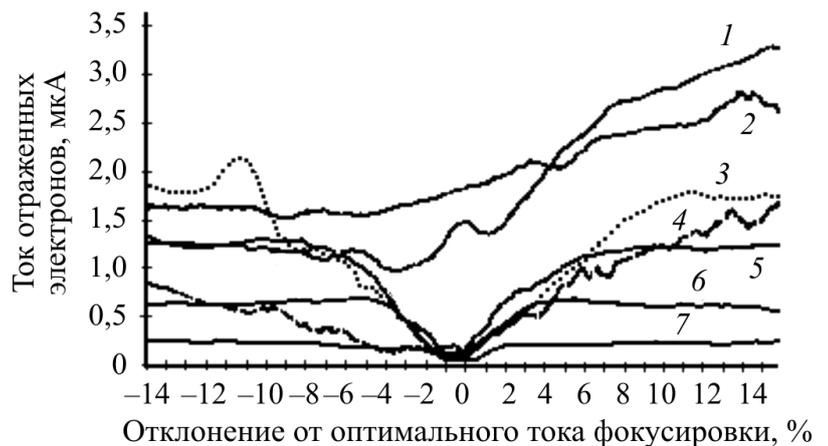


Рисунок 1.11 – Сигнал отраженных электронов при изменении тока фокусировки пучка и различных значениях тока пучка: 1 – 80 мА; 2 – 100 мА; 3 – 30 мА; 4 – 70 мА; 5 – 20 мА; 6 – 10 мА; 7 – 1 мА; ускоряющее напряжение 60 кВ

тока отраженных электронов от отклонения тока фокусировки электронного пучка от оптимального значения, обеспечивающего максимальную глубину проплавления, при различной мощности пучка. При мощности электронного пучка до 4,5 кВт (ток пучка 75 мА), воздействующего на образец из углеродистой стали (рабочая дистанция 200 мм), наблюдается хорошо выраженный минимум сигнала от-

раженных электронов, который можно использовать для управления процессом ЭЛС.

На рисунке 1.12 приведены результаты измерения спектра колебаний тока отраженных электронов в диапазоне 150–3800 Гц. Из графика видно, что в случае формирования канала проплавления в металле при острой фокусировке электронного пучка возникает колебательная составляющая сигнала, отсутствующая при расфокусированном пучке (кривая 3 на рисунке 1.12). При увеличении тока (мощности) электронного пучка амплитуда этих колебаний растет, а их максимум находится практически на

одной и той же частоте. В работе [72] установлено, что частота и амплитуда этого максимума сигнала (он еще сильнее выражен при регистрации ионного тока) в значительной степени зависят от типа свариваемого металла и при ЭЛС образцов из меди максимум наблюдается на частоте 2 кГц, в то время

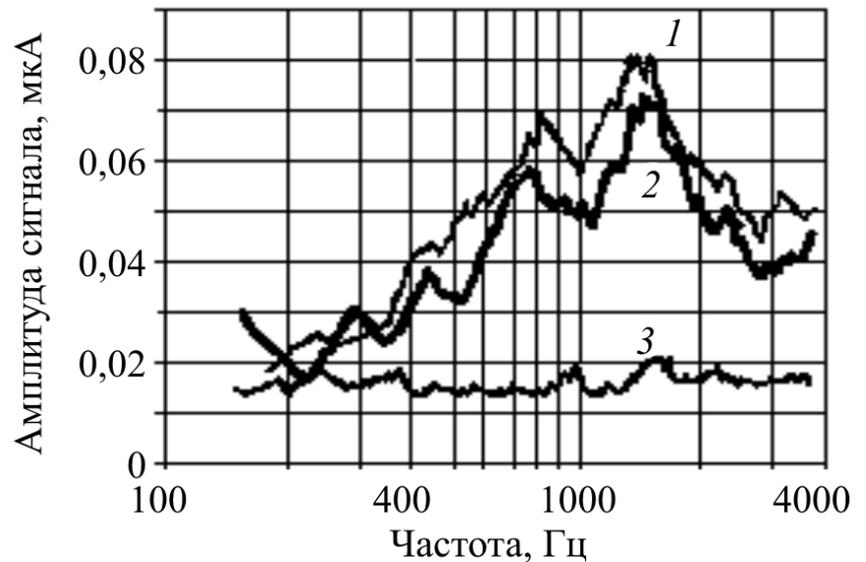


Рисунок 1.12. Частотный спектр сигнала отраженных электронов при энергии 60 кэВ: 1 – остро сфокусированный пучок (ток 60 мА); 2 – остро сфокусированный пучок (ток 30 мА);

как для стали он наблюдается на частоте 1,5 кГц. Было установлено, что максимум в спектре переменных составляющих достигается при незначительной дефокусировке электронного пучка, но тогда при формировании сварного шва имеют место процессы турбулентности и в шве обнаруживается большое количество дефектов. Данная величина фокусировки электронного пучка не обеспечивает получение качественных сварных швов. В самой низкочастотной области спектра колебаний сигнала отраженных электронов также наблюдался незначительный мак-

симум на частоте около 40 Гц, связанный, по-видимому, с гидродинамическими процессами в канале проплавления.

Постоянная составляющая тока отраженных электронов сохраняет характер функции с минимумом при разных расстояниях от центра фокусирующей линзы до поверхности свариваемого изделия (рисунок 1.13). Оптимальное расстояние от центра фокусирующей системы электронной пушки до поверхности образца для данной пушки составляет 200–

280 мм. Но даже при больших расстояниях от электронной пушки до свариваемого изделия наблюдается минимум сигнала и помехи не влияют на его измерение. Изменение положения этого минимума всегда соответствует изменению позиции фокуса электронного пучка, что позволяет использовать ее параметры для автоматического управления процессом ЭЛС. Недостатком управления фокусировкой электронного пучка по этому сигналу является необходимость определения, с какой

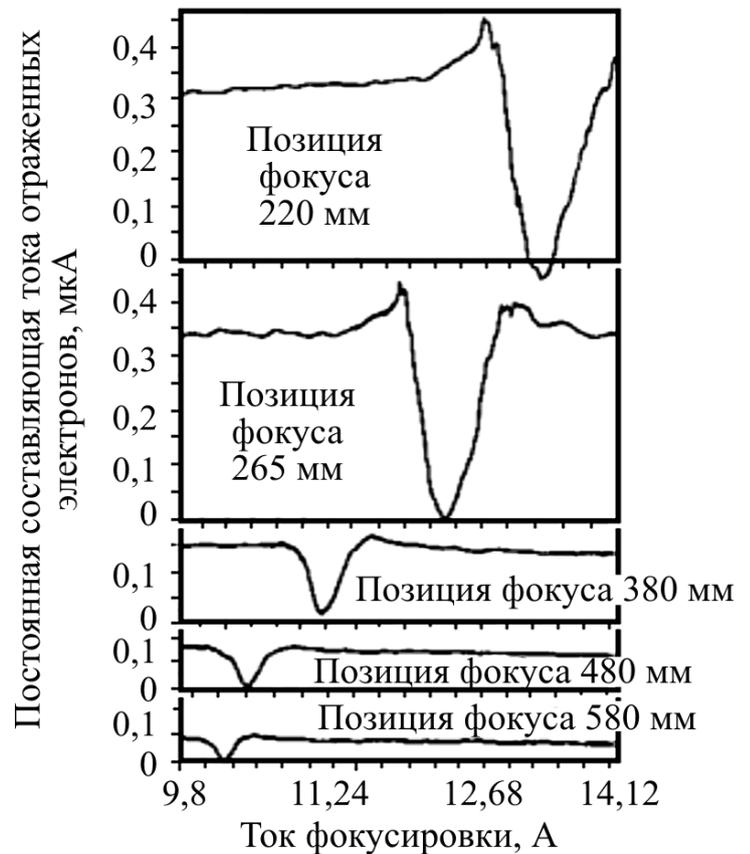


Рисунок 1.13 – Сигнал постоянной составляющей тока отраженных электронов при токе пучка 10 мА, ускоряющем напряжении 60

стороны от минимума кривой находится точка, в которой измеряется сигнал. При скорости изменения тока фокусировки порядка единиц ампер за секунду скорость сканирования (с целью определения оптимального значения тока фокусировки) оказывается недостаточной. Но экспериментальные исследования при более высоких скоростях изменения тока фокусировки показали, что не только индуктивность фокусирующей системы ограничивает скорости сканирования позиции фо-

куса электронного пучка. В работе [74] была установлена зависимость положения минимума сигнала от скорости и направления изменения тока фокусирующей системы (рисунок 1.14). Вероятной причиной наличия такой зависимости является как инерционность процессов плавления и испарения металла, так и инерционность гидродинамических процессов в жидком металле, определяющих скорость углубления канала проплавления в материал свариваемого изделия. При оценке этого выявлено, что углубление дна канала проплавления на расстояние 10–20 мм происходит в среднем за 1–10 мс, и это ограничивает величину скорости сканирования тока фокусировки при использовании для контроля фокусировки постоянной составляющей вторично-эмиссионного сигнала.

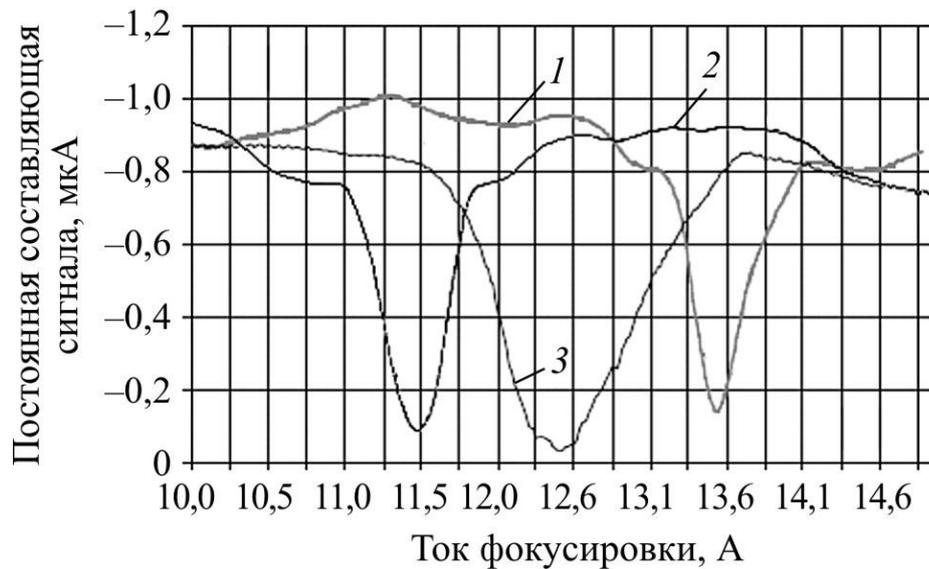


Рисунок 1.14 – Постоянная составляющая сигнала отраженных электронов: 1 – при нарастании тока фокусировки со скоростью 100 А/с; 2 – 100 А/с; 3 – при снижении тока фокусировки со скоростью 2,3 А/с

В большинстве работ, посвященных изучению возможности использования вторично-эмиссионных сигналов для контроля параметров проплавления, для значений мощности электронного пучка до 5 кВт была установлена корреляция постоянной составляющей вторично-эмиссионных сигналов с уровнем фокусировки, а, следовательно, и с глубиной шва. Обычно такое заключение основывалось на качественном совпадении характера изменения вторично-эмиссионного

сигнала с изменением глубины шва на продольном макрошлифе (рисунок 1.15) [73].

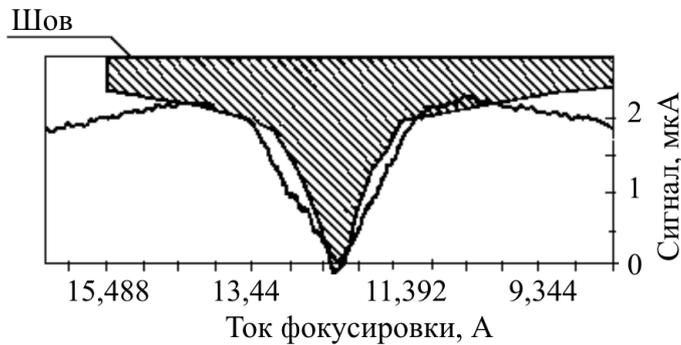


Рисунок 1.15 – Вторично-эмиссионный сигнал и продольный макрошлиф шва при ЭЛС с ускоряющим напряжением 60 кВ и током электронного пучка 30 мА  $\beta$  – недофокусированный пучок (ток 30 мА)

Но в ряде работ, опубликованных в 80–90-х годах, были сделаны попытки обнаружить взаимосвязь отдельных пульсаций регистрируемого вторично-эмиссионного сигнала с формированием пиков проплавления в корне сварного шва или с корневыми дефектами, например, газовыми полостями в корне шва. При этом исследовались как параметры электронных токов вторичной эмиссии, так и ионный ток, регистрируемый коллектором с отрицательным потенциалом. Целесообразность регистрации ионного тока обосновывалась предположением, что эта составляющая содержит информацию о колебаниях интенсивности парового потока, выходящего из канала проплавления в жидкой фазе [75]. На рисунке 1.16 приведена зависимость тока отраженных электронов от тока электронного пучка при ЭЛС стали с ускоряющим напряжением 30 кВ и скоростью сварки 15 м/ч.

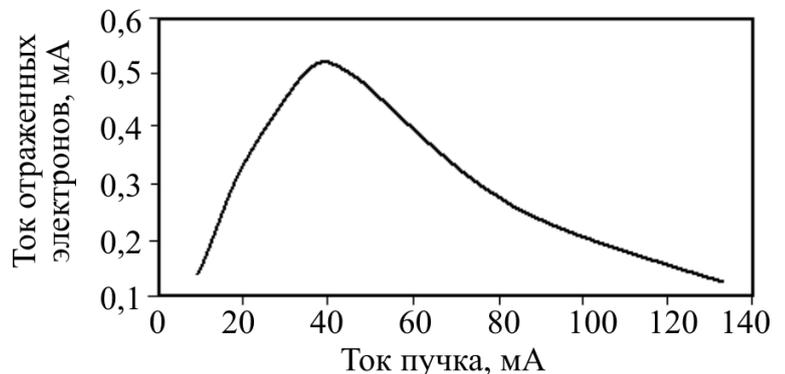


Рисунок 1.16 – Изменение тока отраженных электронов при изменении тока электронного пучка

Из графика видно, что при возрастании тока пучка растет и число упруго и неупруго отраженных от поверхности металла электронов. При токе электронного пучка 40 мА начинается интенсивное плавление, испарение и в сварочной ванне образуется канал проплавления. При этом выход истинно вторичных электронов значительно уменьшается. С ростом глубины канала проплавления вероятность выхода из канала отраженных электронов тоже падает. При значениях тока пучка 160–200 мА основное количество отраженных электронов поглощается и рассеивается в канале проплавления, который в данном случае играет роль цилиндра Фарадея, выпуская только незначительное количество отраженных и истинно-вторичных электронов. В этом случае регистрируемый ток отраженных электронов с энергией, превышающей отрицательный потенциал коллектора, составляет сотые доли миллиампер. В то же время ионный ток на коллектор достигал величины 2–3 мА. Это свидетельствует о том, что в случае исследования процесса ЭЛС с мощностью электронного пучка 3–5 кВт при регистрации вторично-эмиссионного сигнала с использованием коллектора с отрицательным потенциалом 50–100 В ток отраженных электронов можно не учитывать.

Исследования в этом направлении интенсивно велись в восьмидесяти-девяностые годы прошлого столетия. Получила известность работа [76], в которой автор сделал попытку окончательно решить все вопросы, связанные с использованием вторично-эмиссионных методов для управления процессом. В исследовании применялась одновременная запись сигналов вторичного тока, токов луча, токов отклоняющих катушек и т.д. на магнитные ленты. Далее после сопоставления полученных сигналов с профилем продольных шлифов полученных сварных швов был сделан вывод о неприменимости данных сигналов для управления процессом электронно-лучевой сварки. Работа обладает рядом недостатков. Во-первых, при измерениях вторичных сигналов применялся заземленный коллектор (электрод). Сигнал такого коллектора обладает сложным составом. Такой коллектор регистрирует одновременно попадания и положительных и отрицательных ионов, термоэлектронов, отраженных и вторичных электронов. Результирующий

сигнал описывает сумму отдельных токов и зачастую малоинформативен. Вторым недостатком – исследовалось поведение только низкочастотных составляющих (порядка нескольких герц – десятков герц). Недостаток обусловлен ограничениями применяемой техники и некоторой прямолинейностью подхода. По сути, в работе искалась прямая зависимость между колебаниями глубины проплавления и колебаниями вторичного сигнала.

Позднее Беленьким В.Я. были научно обоснованы методы исследования и управления электронно-лучевой сваркой по сигналу тока несамостоятельного разряда в плазме, протекающего в цепи коллектора, находящегося под положительным потенциалом относительно свариваемого изделия. Сигнал тока в плазме (обусловленный термоэлектронным током) оказался более информативным. Несмотря на ограничение применяемых методов измерения и анализа сигналов в плазме было найдено большое количество зависимостей сигнала с параметрами сварочного процесса. В исследованиях применялись счетчики сигналов, записывающие осциллографы, аналоговые фильтры и т.д. В сигнале плазмы было выделено две составляющие – с частотами порядка 500 Гц и частотами более 5 кГц, отражающие, по мнению исследователей, упомянутые колебания зоны взаимодействия по глубине и взрывные вскипания. Составляющие исследовались очень грубо, но оказалось, что их амплитуды и частоты интегрально связаны с фокусировкой электронного пучка. Кроме того, отмечался стохастический характер этих колебаний.

В начале двухтысячных годов в исследованиях Трушникова Д.Н. начала применяться запись сигналов в плазме на персональный компьютер с последующей спектральной обработкой. Такой подход позволил установить новые закономерности. В частности, отдаленно представить структуру сигнала. Было установлено, что сигнал состоит из ряда серий импульсов. Оказалось, что при введении периодических воздействий на луч (модуляции тока луча или развертки луча по некоторым траекториям) происходит упорядочивание колебаний, серии импульсов начинают следовать с определенной частотой, равной частоте колебаний. Ра-

бота обладает рядом недостатков и требует продолжения исследований. Не проводилась одновременная запись сигналов в отклоняющих катушках и сигналов в плазме, что необходимо для понимания того, как серии импульсов синхронизированы с колебаниями луча в канале проплавления. Это знание очень важно для научного обоснования методов выбора видов осцилляции и выбора методов управления электронно-лучевой сваркой по параметрам тока в плазме. Кроме того, применяемое оборудование обладало низкой частотой дискретизации.

Ситуация изменилась после того, как в 2008 г. были проведены исследования на измерительном оборудовании с частотой дискретизации 500 кГц, которые можно считать заделом данной заявки [25]. Впервые стала подробно видна структура вторичного сигнала, а значит и временная структура процессов в канале проплавления. Оказалось, что взрывные вскипания происходят не стохастически, а следуют друг за другом практически периодически с частотой порядка 20 кГц которая зависит от рода материала и от режима сварки. В спектре Фурье наблюдается отчетливый максимум на этой частоте. Уширение максимума может быть обусловлено тем, что частота плывет по времени, либо тем, что стохастически меняется амплитуда импульсов. Была установлена правильность второго утверждения. Исследования проводились на базе предприятий заказчиков оборудования по контролю параметров электронно-лучевой сварки, что обуславливало их низкую производительность. На данный момент кафедрой коллектива грантосоискателей приобретена собственная установка для электронно-лучевой сварки и появилась возможность начать исследования на новом уровне. Необходимо лишь финансирование, направленное на приобретение образцов из различных материалов, содержание оборудования и т.д.

На сегодняшний момент опыт коллектива соискателей гранта в проведении исследований, заявленных в гранте, является для нашей страны уникальным. Подобные исследования ведутся только в Красноярске коллективом исследователей, руководимым Браверманном В.Я. Однако, как уже отмечалось, применение ими датчиков рентгеновского излучения ограничивает применение их методов слож-

ностью оборудования, а самое главное полностью исключает исследования высокочастотных процессов в канале проплавления. Именно параметры, поведение и структура высокочастотной составляющей должны нести большинство информации о процессах, сопутствующих электронно-лучевой сварке.

Из зарубежного опыта можно отметить работы коллектива из Болгарии [77]. Указанным исследованиям присущи недостатки, связанные с использованием заземленного коллектора и низкой частоты дискретизации (до 8 кГц). В работе [78] исследовались высокочастотные (порядка десятков мегагерц) резонансные колебания, возникающие в пучково-плазменном разряде. Всегда активно велись исследования в области использования вторично-эмиссионных сигналов в Японии. Затем последовало некоторое затишье. Однако после 2005 года можно отметить все увеличивающуюся долю подобных работ в изучении электронно-лучевых и лазерных технологий (лазерные технологии являются родственными и считается, что для них характерны все основные закономерности присущие электронно-лучевой сварке). Необходимо отметить работу [79] 2010 года очень близкую по характеру к сравнительно ранним исследованиям соискателей грантов. Следует отметить, что в ней исследуется спектр Фурье полученного сигнала в достаточно низком диапазоне частот (до 1 кГц). Кроме того, опыт показывает, что применения только преобразования Фурье уже недостаточно. Необходимо применение оконных преобразований Фурье, Вейвлет преобразований и др. Применение Вейвлет анализа на примере исследования низкочастотных (до 1 кГц) световых сигналов из области сварки лазерным лучом приведено в работе [80]. Представляет интерес работа [81], в которой авторы попытались экспериментально оценить влияние динамической фокусировки на формирование сварного шва без изучения механизмов явлений, возникающих при этом.

Таким образом, видно, что вновь возрождается тенденция к изучению процессов в канале проплавления с помощью вторично-эмиссионных методов [82]. Это обусловлено недостатком знаний об этих процессах, недостатком научно обоснованных методов управления электронно-лучевой сваркой, которые необхо-

димы для развития и создания новых бездефектных технологий электронно-лучевой сварки. Сложность происходящих явлений делает затруднительным построение численных экспериментов даже на современном уровне, что вынуждает вновь возвращаться к поискам способов экспериментальных исследований. Теоретический и экспериментальный уровень ожидаемых результатов по всем направлениям сопоставим с мировым, многие результаты будут получены впервые.

## 1.5 Выводы по главе 1

1. Процесс ЭЛС сопровождается множеством излучений, характер и законы изменения которых, согласно исследованиям, связаны с особенностями процесса формирования канала проплавления. При регистрации и анализе величин, характеризующих параметры потока частиц, эмиссия которых происходит в ходе взаимодействия электронного луча с металлом, основные сложности связаны с поиском методов и схем, позволяющих выделить полезную информацию из сигнала, для которого свойственно наличие высокого уровня шумов и широкий спектр частот. В рамках данной работы наибольший интерес вызвала корреляция в законе изменения высокочастотной составляющей с величиной фокусировки электронного луча.

2. После рассмотрения множества технологических приемов, позволяющих повышать качества сварного шва, необходимо отметить факт, что использование подходов, связанных с изменением фокуса, является либо спорным, либо не полностью изученным с точки зрения влияния на качество сварного шва. Поскольку задача данной работы – поиск и стабилизация оптимальной точки фокусировки, то одной из составляющих технологического процесса будет являться сканирование фокуса. Необходимо оценить степень влияния данного приема на форму канала проплавления и выявить оптимальные параметры сканирования (амплитуда, частота, траектория), позволяющие свести это влияние к минимуму.

3. Результаты исследований корреляции фокусировки и вторичного электронного тока на настоящий момент не дают исчерпывающей информации для построения систем управления фокусом, поскольку нет достоверных динамических моделей изменения сигнала вторичного электронного тока в зависимости от положения фокуса.

4. Основной задачей работы является построение системы управления фокусом луча, которая бы позволяла в процессе сварки поддерживать заданную величину положения фокуса. Решение данной задачи позволит повысить качество сварных швов за счет автоматической компенсации дрейфа заданной точки фокусировки из-за влияния внешних факторов.

## ГЛАВА 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ФОКУСИРОВКИ НА ВТОРИЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТОК В ПЛАЗМЕ

На основании анализа всех информационных параметров и способов воздействия на электронный луч было предложено выбрать в качестве информационного параметра системы управления фокусировкой вторичный электронный ток в плазме. При этом необходимо ввести колебательные воздействия в траекторию перемещения луча с целью использования его в качестве сканера поверхности канала проплавления.

Перед началом эксперимента формулируется следующая гипотеза: закон изменения вторичного электронного тока в плазме зависит от фокусировки электронного луча. Далее в работе под вторичным током будет подразумеваться вторичный электронный ток в плазме.

Вторичный ток был выбран в качестве информационного параметра по ряду причин, выявленных в ходе предварительного сравнения характеристик излучений, сопровождающих ЭЛС [83-85]. Среди них можно выделить следующие:

- простота и технологичность датчика для регистрации излучения, который представляет собой коллектор в виде металлического кольца, к которому прикладывается положительное напряжение;
- низкая степень изученности всех особенностей излучения при нахождении луча в пределах сварочной ванны;
- очевидная взаимосвязь сигнала с тепловыми процессами в канале проплавления, во многом определяемыми фокусировкой электронного луча.

Поскольку основной задачей автоматизированной системы, созданию которой посвящена диссертация, является стабилизация фокуса, необходимо реализовать механизм поиска точки оптимального фокуса, следовательно, в данной ситуации логично применить прием сканирования фокуса, конкретные рекомендации по использованию которого отсутствуют. Поэтому одной из задач исследования

необходимо постановить определение влияния процесса сканирования фокуса на параметры сварного шва.

## 2.1 План проведения экспериментальных работ

Для изучения особенностей изменения высокочастотной составляющей сигнала вторичного тока собрана схема, изображенная на рисунке 2.1.

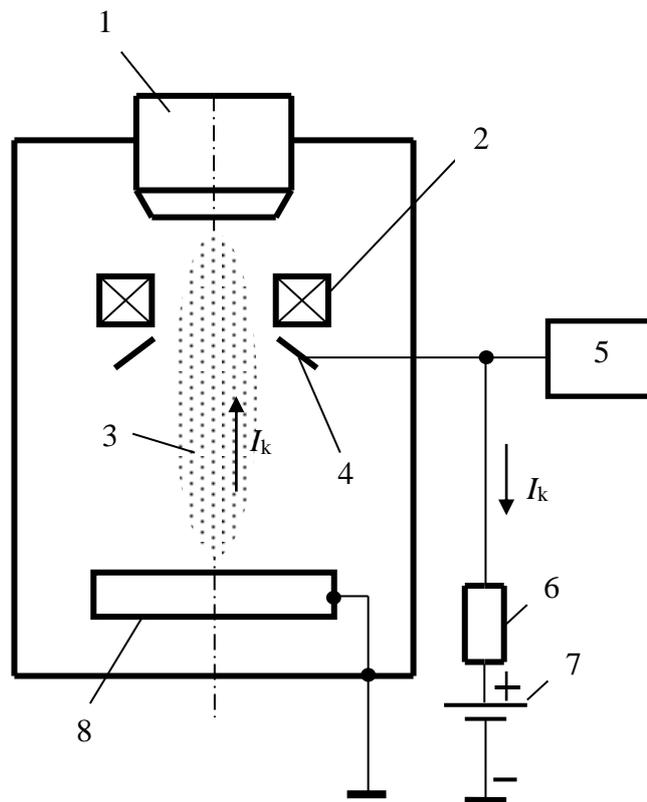


Рисунок 2.1 – Схема регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, образующейся над областью электронно-лучевой сварки.

1 – электронная пушка; 2 – фокусирующая линза; 3 – плазма, образующаяся над областью электронно-лучевой сварки; 4 – коллектор электронов; 5 – система регистрации; 6 – резистор нагрузки; 7 – источник смещения; 8 – обрабатываемое изделие.

При проведении экспериментов сваривали образцы из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (8) на электронно-лучевой сварочной установке ЭЛУ-9 с источником питания ЭЛА-60/60 (1), изменяя в широких пределах значения токов

фокусирующей системы (2) и токов электронного луча, с помощью соответствующих блоков управления. Электронно-лучевую сварку производили сканирования и со сканированием фокуса электронного пучка синусоидальными колебаниями. Основная задача эксперимента – установить взаимосвязь между положением фокуса и изменением сигнала высокочастотной составляющей вторичного тока, также в ходе исследований необходимо изучить влияние амплитуды и частоты сканирования фокуса на характер формирования сварного шва, в связи с чем, в ходе экспериментов эти параметры также изменяли в широких пределах. Частоты сканирования лежали в диапазоне 100...12000 Гц.

Таким образом, в качестве варьируемых параметров процесса были выбраны следующие:

1. Сила тока луча ( $I_{л}$ );
2. Отклонение тока фокусировки от значения при максимальной глубине проплава ( $\Delta I_{ф}$ );
3. Частота сканирования луча ( $f$ );
4. Амплитуда сканирования фокуса ( $2A$ ).

Таблица 2.1 – границы варьирования параметров эксперимента.

Варьируемый фактор	$\Delta I_{ф}$ , мА	$f$ , Гц	$I_{л}$ , мА	$2A$ , мА
Нижний предел	-16	100	25	5
Верхний предел	16	12000	40	20

Полученная информация о сигнале вторичного тока сведена в массив данных, охватывающий наиболее значимые для данного эксперимента вариации перечисленных параметров.

## **2.2 Методика проведения экспериментов**

По полученным результатам строились статистические модели, позволяющие глубже понять физические взаимосвязи геометрических параметров полученных швов с параметрами периодического воздействия. Для сравнения делалась серия экспериментов статичным лучом, во время которых менялся только ток фокусировки.

Во время выполнения сварочных проходов, с помощью компьютерной информационно-измерительной системы на базе IBM-совместимого компьютера, оснащенного многоканальным аналого-цифровым интерфейсом, регистрировался ток, проходящий в цепи коллектора вторичных электронов, расположенного над зоной сварки и находящегося под положительным потенциалом 50 В. Одновременно регистрировались сигналы, пропорциональные току в отклоняющих катушках. Результаты регистрации записывались в файл для дальнейшей обработки. Частота дискретизации в проведенных экспериментах равнялись 400 кГц на два измерительных канала. Далее с использованием прикладных пакетов программного обеспечения Matlab, Mathcad осуществлялась обработка полученных при регистрации сигналов. Чтобы сократить число экспериментов, продуктивно использовать имеющиеся образцы и получить полную картину исследований применялось планирование эксперимента [86,87].

### **2.2.1 Активное планирование эксперимента**

Перед проведением экспериментальной работы необходимо составить оптимальный план действий, который позволит при минимальных временных затратах получить максимально возможный объем экспериментальных данных [88].

Движение по методу крутого восхождения заканчивается, когда достигнута область оптимума. Область оптимума не может быть описана линейным уравнением регрессии. В этой части поверхности отклика доминирующими становятся

эффекты взаимодействия факторов и квадратичных эффектов. Область оптимума можно описать полиномами более высоких порядков, среди которых самыми распространенными являются уравнения второго порядка:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (2.1)$$

Для получения уравнений регрессии второго порядка необходимо построить такие планы, в которых каждая переменная будет принимать хотя бы три разных значения.

### Выбор числа уровней

Так как для построения математической модели второго порядка двумя уровнями варьирования ограничиться нельзя, то естественно предложить планы на трех уровнях – типа  $3^k$ . Если число факторов больше четырех, полный факторный эксперимент на трех уровнях становится неэкономичным.

Дополнив двухуровневый план факторного эксперимента определенными точками, можно получить план с меньшим числом опытов, чем план типа  $3^k$ . Общее число опытов при таком планировании определяется формулой

$$N = 2^k + 2k + N_0 \quad (2.2)$$

где  $N_0$  – число опытов в нулевой точке.

Из приведенной выше формулы видно, что предлагаемые планы экономичнее планов на трех уровнях. Большим преимуществом таких планов является возможность их получения из планов типа  $2^k$ . Для их построения используется ядро плана  $2^k$ , план дополняется некоторым количеством специально подобранных звездных точек. При  $k > 4$  можно использовать дробные реплики. Планы, организованные таким образом, называются центральными или композиционными. Композиционный план для двух факторного эксперимента приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	-1	+1	+1
3	+1	+1	-1	-1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	$\alpha$	0	0	$\alpha^2$	0
6	+1	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2$	0
7	+1	0	$\alpha$	0	0	$\alpha^2$
8	+1	0	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2$
9	+1	0	0	0	0	0

где  $\alpha$  – звездное плечо. Выбор звездного плеча и числа звездных точек зависит от критерия оптимальности. В технических исследованиях широко применяются ортогональные и ротатабельные планы второго порядка.

#### Ортогональное планирование второго порядка

Ортогональность является одним из наиболее важных свойств матрицы. Свойство ортогональности – сумма построчных произведений элементов любых двух столбцов равна нулю

$$\sum_{j=1}^N x_{i,j} \cdot x_{l,j} = 0 \quad (2.3)$$

где  $i, j$  – номера факторов, причем  $i \neq l$ .

Ортогональность матрицы позволяет оценить все коэффициенты уравнения регрессии независимо друг от друга, то есть величина любого коэффициента не зависит от того, какие величины имеют другие коэффициенты. Если тот или иной коэффициент регрессии окажется незначимым, то его можно отбросить, не пересчитывая остальных. Для получения ортогональных планов второго порядка необходимо несколько преобразовать столбцы квадратичных переменных и стол-

бец  $x_0$ . Это вызвано неортогональностью указанных столбцов матрицы планирования, так как

$$\sum_{j=1}^N x_{0,j} \cdot x_{i,j}^2 \neq 0 \quad \sum_{j=1}^N x_{l,j}^2 \cdot x_{i,j}^2 \neq 0 \quad (2.4)$$

Неравенства справедливы, поскольку значения в столбцах  $x_0$  и  $x_i^2$  всегда положительны. В ортогональных планах на количество опытов в центре плана обычно не накладывают никаких условий, поэтому  $N_0$  часто принимают равным нулю. Ортогональность плана можно обеспечить за счет выбора звездного плеча. Расчет звездного плеча для ПФЭ типа  $2^k$  проводят по формуле

$$\alpha^4 + 2^k \alpha^2 - 2^{k-1} \cdot (k + 0,5 \cdot 2^k) = 0 \quad (2.5)$$

а при  $2^{k-1}$  (полуреплика) по формуле

$$\alpha^4 + 2^{k-1} \alpha^2 - 2^{k-2} \cdot (k + 0,5 \cdot 2^k) = 0 \quad (2.6)$$

В табл. 2.3 приведены значения  $\alpha$ , вычисленные по приведенным выше формулам.

Таблица 2.3

$N_0$	k				$N_0$	k			
	2	3	4	5 (полуреплика)		2	3	4	5 (полуреплика)
1	1,00	1,215	1,414	1,546	6	1,32	1,525	1,718	1,819
2	1,072	1,285	1,471	1,606	7	1,369	1,575	1,772	1,868
3	1,148	1,353	1,546	1,664	8	1,414	1,623	1,819	1,913
4	1,214	1,414	1,606	1,718	9	1,457	1,668	1,868	1,957
5	1,267	1,471	1,664	1,772	10	1,498	1,711	1,913	2,00

Для ортогонализации плана необходимо преобразовать столбцы матрицы, заменив  $x_i^2$  новой переменной  $x_i'$ . Новую переменную можно определить по выражению

$$x_i' = x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \quad (2.7)$$

Пример ортогонального плана второго порядка для двухфакторного эксперимента приведен в таблице 2.3. В ней по сравнению с таблицей 2.2 вместо  $x_i^2$  введена новая переменная  $x_i'$ , а вместо  $\alpha$  взяты ее значения из табл. 2.4.

Таблица 2.4

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	-1	+1	+1
3	+1	+1	-1	-1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	+1	0	0	$\alpha^2$	0
6	+1	-1	0	0	$\alpha^2$	0
7	+1	0	$\alpha$	0	0	$\alpha^2$
8	+1	0	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2$
9	+1	0	0	0	0	0

Существенным недостатком ортогональных планов является отсутствие ротатабельности.

#### Ротатабельное планирование второго порядка

Свойство ротатабельности заключается в том, что точки в матрице планирования подбирают так, что математическая модель, полученная по результатам полного или дробного факторного эксперимента, способна предсказать значения параметра оптимизации с одинаковой точностью в любых направлениях [89]. Как показали многочисленные исследования в теории планирования эксперимента, критерий ортогональности не является достаточно сильным критерием оптимизации: информация, полученная при ортогональном планировании второго порядка, различна в разных направлениях [90,91]. Ротатабельность центрального композиционного плана достигается выбором величины звездного плеча  $\alpha$ . Величину звездного плеча  $\alpha$  для ПФЭ определяют  $\alpha=2^{k/4}$ , а для дробной реплики  $\alpha=2^{k-p/4}$ .

Данные, необходимые для построения матриц ротатабельного планирования второго порядка при числе факторов от 2 до 7 приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Число факторов $k$	Ядро плана	Число точек ядра	Число звездных точек	Число нулевых точек	Величина звездного плеча $\alpha$	Общее число опытов $N$
2	$2^2$	4	4	5	1,414	13
3	$2^3$	8	6	6	1,682	20
4	$2^4$	16	8	7	2,00	31
5	$2^5$	32	10	10	2,378	52
5	$2^{5-1}$	16	10	6	2,00	32
6	$2^6$	64	12	15	2,828	91
6	$2^{6-1}$	32	12	9	2,378	53
7	$2^7$	128	14	21	3,363	163
7	$2^{7-1}$	64	14	14	2,828	92

Построение уравнения регрессии. Статистическая обработка данных

Коэффициенты уравнения регрессии определяем с помощью выражения:

$$b = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (2.8)$$

Для вычисления дисперсии воспроизводимости экспериментов выполняют несколько параллельных опытов в нулевой точке. При постановке опытов в нулевой точке все факторы находятся на нулевых уровнях. По результатам опытов вычисляют дисперсию воспроизводимости эксперимента  $S_y^2$  по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_i - y_{cp})^2}{n_0 - 1} \quad (2.9)$$

где  $y_i$  - значение параметра оптимизации в  $i$ -м опыте;  $y_{cp}$  - среднее арифметическое значение параметра оптимизации в  $n_0$  параллельных опытах.

Среднюю квадратичную ошибку в определении коэффициентов регрессии определяют по формуле с помощью диагональных коэффициентов матрицы  $C = (X^T X)^{-1}$ :

$$S(b_i) = \sqrt{C_{ii} \cdot S_y^2} \quad (2.10)$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии:

$$db_i = \pm t \cdot S(b_i) \quad (2.11)$$

Дисперсию адекватности  $S_a^2$  определяют по формуле:

$$S_a^2 = \frac{S_R - S_E}{f}, \quad (2.12)$$

где  $S_R$  - сумма квадратов отклонений расчетных значений  $y_{ir}$  от экспериментальных  $y_j$ , а  $S_E$  - сумма квадратов отклонений экспериментальных значений в центре плана от их среднего значения.

$$S_R = \sum_{j=1}^N (y_{ir} - y_j)^2, \quad S_E = \sum_{u=1}^{n0} (y_u - y_s)^2 \quad (2.13)$$

Число степеней свободы  $f$  с учетом опытов, приведенных в центре плана, определяли по формуле:

$$f = N - k - (n0 - 1) \quad (2.14)$$

где  $k$  - число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Гипотезу адекватности модели проверяют по  $F$ -критерию Фишера [91], используя формулу

$$F_p = \frac{S_a^2}{S_y^2} \quad (2.15)$$

Полученный расчетный  $F$ -критерий сравнивают с теоретическим, который определяют по таблице либо с помощью встроенной функции в математическом пакете MathCad.

Из двух приведенных выше методов планирования было выбрано ротационное планирование второго порядка. Этот способ наиболее полно удовлетворяет всем требованиям проведения экспериментов и позволяет с высокой точностью оценить адекватность полученных математических моделей.

### 2.2.2 Применение синхронного накопления

Сигнал вторичного тока характеризуется высокой степенью зашумленности, что подтверждается результатами исследования. Выделение сигнала переменного тока на фоне больших шумов, когда фазовые компоненты сигнала несут полезную информацию, это задача, одним из наиболее распространенных методов решения которой является синхронное детектирование [92].

В ходе дальнейшего анализа была установлена необходимость использования операции интегрирования данных, получаемых при детектировании. Данный метод называется методом синхронного накопления [93]. Модификация по сравнению с синхронным детектированием заключается в том, что осуществляется не только перемножение исходного сигнала на опорный с последующей фильтрацией, но также выполняется суммирование полученного сигнала на определенном временном интервале.

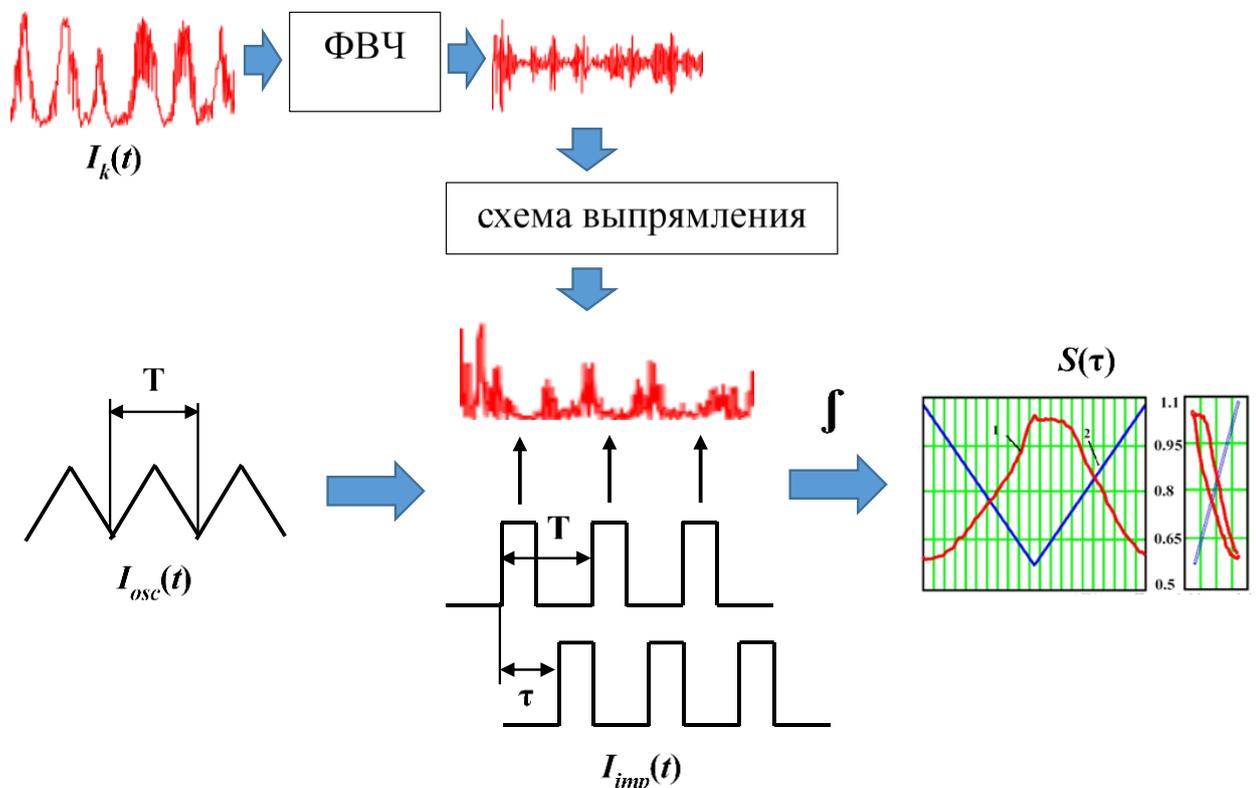


Рисунок 2.2 – Блок-схема реализации метода синхронного накопления

Реализация метода синхронного накопления поясняется с помощью блок-схемы на Рисунок 2.2. Для реализации метода синхронного накопления из периодического сигнала отклоняющихся катушек  $I_{osc}(t)$  с периодом  $T$  формируется прямоугольный опорный сигнал малой скважности такого же периода –  $I_{imp}(t)$ . Опорный сигнал  $I_{imp}(t+\tau)$  сдвигается относительно полученного сигнала  $I_{imp}(t)$  на заданный промежуток времени  $\tau$ .

Сигнал вторичного тока  $I_k(t)$  обрабатывается цифровым или аналоговым фильтром высоких частот с частотой среза около 10 кГц. Полученный сигнал высокочастотной составляющей выпрямляется и затем перемножается с базовым сигналом –  $I_{imp}(t+\tau)$ .

Результат интегрируется по времени:

$$S(\tau) = \int_0^{t_0} I_{imp}(t + \tau) \cdot |Data(t)| dt \quad (2.16)$$

где  $t_0$  – опорное время.

Точность конечного результата также зависит от полосы пропускания низкочастотного фильтра, предусмотренного для обработки исходного сигнала перед синхронным накоплением [94]. Для данного параметра характерна обратная зависимость с соотношением сигнал/шум. В связи с этим следует подчеркнуть, что использование метода требует предварительной настройки параметра полосы пропускания низкочастотного фильтра для достижения максимальной детальности характеристики при максимальной величине соотношения сигнал/шум.

Поскольку для анализа вторичного излучения электронов данный метод ранее не применялся, потребуется выборка, охватывающая максимально обширный диапазон режимов фокусировки. Добиться подобного результата возможно используя активное планирование эксперимента. При соблюдении данных условий можно говорить об эмпирическом подтверждении гипотезы существования корреляции между сигналом вторичного тока электронов и положением фокуса относительно поверхности свариваемого изделия [95].

### 2.3 Результаты эксперимента

Данные эксперимента, перечисленные в таблице ниже обрабатывались в соответствии с описанной методикой. Сигнал коллектора вторичных электронов обрабатывался методом синхронного накопления при различных параметрах электронного луча.

Таблица 2.6

$I$ , мА	$I_f$ , мА	$2A$ , мА	$f$ , Гц	Результат обработки, отн.ед.
40	820	6	1523	1,35E-05
40	824,5	6	1523	3,25E-05
40	834,66	6	1523	-1,56E-05
40	842,86	6	1523	-7,90E-06
40	851,43	6	1523	-2,36E-05
35	855,36	10	966	-2,14E-04
35	836,4	10	966	-2,26E-04
35	829,3	10	966	1,99E-04
35	821,6	10	966	1,89E-04
35	812,3	10	966	6,99E-05
32	857,2	8	1978	-8,90E-05
32	849,8	8	1978	-2,03E-04
32	842,5	8	1978	-5,47E-05
32	835,1	8	1978	-3,08E-05
32	827,9	8	1978	1,47E-04
35	831,6	10	946	-2,19E-04
35	831	10	1276	-3,51E-05
35	830,6	10	1605	4,74E-05
31	844,5	10	1230	-1,15E-04
31	837,7	10	1230	-2,04E-05
31	830,95	10	1230	3,74E-04
31	824,1	10	1230	3,89E-04
31	817,38	10	1230	2,46E-04
35	834,1	10	8000	5,61E-05
35	834	10	10000	6,32E-05
35	833,8	10	12000	3,07E-05
35	833,7	10	12000	3,11E-05
35	846	10	4000	-2,81E-04
35	846	10	6000	-1,64E-04
35	845,9	10	8000	-9,51E-05
35	845,9	10	10000	-3,99E-05
35	845,8	10	12000	-1,06E-05
25	822,5	13	8000	7,15E-05
25	822,5	13	12000	1,68E-05

31	839,8	20	686	-7,39E-04
31	835,9	20	686	-6,36E-04
31	832,1	20	686	-2,90E-04
31	828,35	20	686	5,56E-04
31	825,93	20	686	7,72E-04
31	820,9	20	686	1,08E-03
31	817,2	20	686	1,05E-03
31	813,3	20	686	8,80E-04
31	845,9	10	686	-1,84E-04
31	842	10	686	-8,61E-05
31	838,4	10	686	-1,88E-04
31	834,7	10	686	-3,41E-04
31	831	10	686	-1,16E-04
31	827,4	10	686	1,96E-04
31	823,7	10	686	3,16E-04
31	820	10	686	2,00E-04
31	816,4	10	686	1,53E-04
31	812,9	10	686	1,60E-04
31	842,6	5	1547	-2,77E-05
31	835,6	5	1547	-6,91E-06
31	828,6	5	1547	4,68E-05
31	821,5	5	1547	4,50E-05
31	814,7	5	1547	3,28E-05
35	835	9	1927,5	-1,44E-05

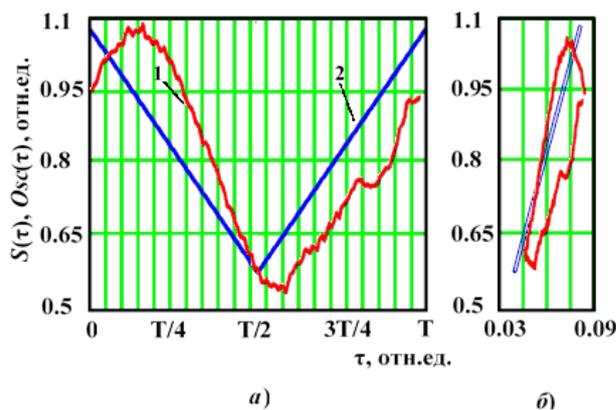


Рисунок 2.3 – Результат обработки высокочастотной составляющей вторичного сигнала методом синхронного накопления при ЭЛС со сканированием фокуса на недофокусированном режиме: а – график функции; б – график функции в фазовом пространстве. 1 – Функция  $S(\tau)$ , являющаяся результатом обработки и 2 – сигнал тока фокусирующей катушки  $Osc(t)$ .

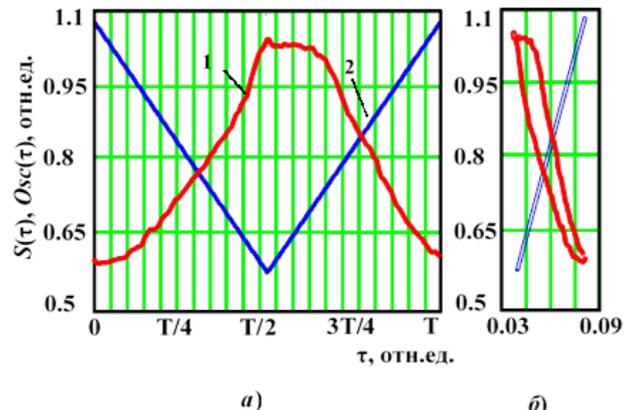


Рисунок 2.4 – Результат обработки высокочастотной составляющей вторичного сигнала методом синхронного накопления при ЭЛС со сканированием фокуса на перефокусированном режиме: а – график функции; б – график функции в фазовом пространстве. 1 – Функция  $S(\tau)$ , являющаяся результатом обработки и 2 – сигнал тока фокусирующей катушки  $Osc(t)$ .

По результатам обработки экспериментальных данных методом синхронного детектирования, описанного выше, можно заключить, что в высокочастотной составляющей сигнала вторичного тока имеются признаки корреляции с положением фокуса. А именно выявлена взаимосвязь между фазой получаемой характеристики и сигнала с отклоняющих катушек (рисунок 2.3, 2.4).

Функция  $S(\tau)$  представляет собой усредненное значение амплитуды высокочастотного вторичного сигнала для каждой величины фазы  $\tau$ . Физическая интерпретация данного метода заключается в том, что в канале проплавления существует зона взаимодействия электронного луча с металлом, которую можно считать областью максимального энерговыделения, в процессе сканирования фокуса эта область перемещается по стенкам канала проплавления. Каждому положению области сопоставляется среднее значение амплитуды высокочастотных колебаний вторичного тока.

На рисунке 2.3а показаны результаты обработки высокочастотной составляющей вторичного сигнала методом синхронного детектирования при ЭЛС со сканированием фокуса для режима сварки недофокусированным электронным лучом. На рисунке 2.3б этот же результат представлен в фазовом пространстве, для чего по горизонтальной оси откладывается значение сигнала сканирования. Аналогичные результаты для перефокусированного режима приведены на рисунке 2.4. Наибольший интерес представляет смена знака коэффициента корреляции при изменении режима фокусировки электронного пучка. При режиме с недофокусированным пучком знак коэффициента положительный. Далее, при увеличении тока фокусировки величина коэффициента монотонно убывает, принимая в районе острой фокусировки электронного пучка нулевые значения. Указанный результат наблюдается во всем диапазоне исследованных значений и подтверждает гипотезу о существовании корреляции между фокусировкой и параметрами вторичного тока в динамическом режиме, характеризующими амплитуду его высокочастотной составляющей.

Таким образом, на текущем этапе достигнуто понимание процесса получения составляющей, несущей в себе полезную информацию о положении фокуса, из сигнала, в котором значительно преобладает шумовая составляющая, нежели информационная. Но данный метод требует внедрения в технологический процесс приема сканирования фокуса (сканирования точки фокусировки по линейной траектории), влияние которого на процесс формирования сварного шва не исследовано полностью и может отличаться при различных параметрах процесса (частота, амплитуда). В следующем разделе будут представлены результаты оценки влияния сканирования фокуса на форму канала проплавления.

#### **2.4 Оценка влияния процесса сканирования фокуса на форму канала проплавления**

Поскольку процесс управления фокусировкой требует введения дополнительного воздействия на электронный луч, а именно сканирования фокуса, необходимо оценить влияние данного воздействия параметры канала проплавления. Для этого был проведен ряд экспериментов с варьированием основных параметров электронного пучка и последующим измерением геометрических параметров сварных швов по их поперечным макрошлифам. В ходе эксперимента изменялись следующие параметры:

$I_{л}$  – ток луча, мА;

$\Delta I_{\phi}$  – отклонение опорного тока фокусировки от значения при максимально остром фокусе, мА;

$2A$  – амплитуда сканирования фокуса, мА;

$f$  – частота сканирования, Гц;

$v$  – скорость перемещения луча по изделию, мм/с.

Результаты экспериментов сведены в таблицу 2.6, в которой каждому режиму сопоставлены геометрические параметры сварного шва: глубина ( $H$ ), ширина поверхностной части ( $W$ ) и их отношение.

Таблица 2.7

$I_{л}, \text{мА}$	$\Delta I_{\phi}, \text{мА}$	$2A, \text{мА}$	$f, \text{Гц}$	$v, \text{мм/с}$	$H, \text{мм}$	$W, \text{мм}$	$H/W$
40	9,9	6	1523	5	9,60	5,66	1,696
40	18,4	6	1523	5	6,47	6,27	1,032
34	-0,2	8	1523	5	9,60	5,57	1,724
39	2,4	8	1523	10	9,99	5,33	1,874
39	2,3	8	1523	10	9,45	5,62	1,681
39	2,2	8	1523	10	9,45	5,62	1,681
39	22,4	10	966	10	4,26	4,61	0,924
39	3,4	10	966	10	7,28	3,9	1,867
39	-3,7	10	966	10	7,04	3,91	1,801
39	-11,4	10	966	10	6,30	3,62	1,74
39	-20,7	10	966	10	4,92	4,49	1,096
32	24,2	8	1978	5	4,80	5,28	0,909
32	16,8	8	1978	5	6,90	5,34	1,292
32	9,5	8	1978	5	8,13	5,31	1,531
32	2,1	8	1978	5	7,37	5,59	1,318
32	-5,1	8	1978	5	7,37	5,59	1,318
36	-3,6	14	899	5	9,30	5,87	1,584
36	-4	14	899	5	9,70	5,67	1,711
36	-4,4	14	899	5	9,90	5,43	1,823
53	8,1	14	899	5	9,70	6,59	1,472
53	7,6	14	899	5	9,50	6,49	1,464
40	-0,9	10	810	5	8,04	5,5	1,462
35	-1,4	10	946	5	8,67	5,5	1,576
35	-1,9	10	1276	5	9,18	5,24	1,752
35	-2,4	10	1605	5	9,56	5,42	1,764
35	-3	10	1840	5	9,56	5,42	1,764
31	11,6	10	1230	5	6,38	5,28	1,208
31	4,7	10	1230	5	7,53	5,37	1,402
31	-2,1	10	1230	5	7,53	5,18	1,454
31	-8,9	10	1230	5	7,15	4,67	1,531
31	-15,6	10	1230	5	5,77	5,22	1,105
35	-3	12	4000	5	9,11	5,57	1,636
35	1,1	12	6000	5	7,89	5,52	1,429
35	1	12	8000	5	9,17	5,46	1,679
35	0,8	12	10000	5	7,36	5,23	1,407
35	1	12	12000	5	7,98	5,28	1,511
35	13,1	11	4000	10	5,00	4,37	1,144
35	13	11	6000	10	4,98	4,1	1,215
35	12,9	11	8000	10	5,25	4,12	1,274
35	12,9	11	10000	10	5,61	4,31	1,302
35	12,8	11	12000	10	4,99	4,15	1,202

25	-10,4	13	8000	5	6,07	4,23	1,435
25	-10,5	13	12000	5	6,02	4,26	1,413
31	7	20	686	5	6,78	5,07	1,337
31	3	20	686	5	6,80	5,16	1,318
31	-1	20	686	5	8,05	5,09	1,582
31	-5	20	686	5	7,61	4,85	1,569
31	-7	20	686	5	8,09	4,75	1,703
31	-12	20	686	5	6,52	4,25	1,534
31	-16	20	686	5	6,50	4,47	1,454
31	13	10	686	5	6,01	5,12	1,174
31	9	10	686	5	6,90	4,85	1,423
31	5,5	10	686	5	7,42	5,32	1,395
31	2	10	686	5	7,35	5,43	1,354
31	-2	10	686	5	7,22	4,74	1,523
31	-9	10	686	5	7,21	4,88	1,477
31	-13	10	686	5	6,45	4,81	1,341
31	-17	10	686	5	6,60	4,69	1,407
31	10	5	1547	7	5,85	4,78	1,224
31	3	5	1547	7	7,69	4,5	1,709
31	-4	5	1547	7	6,40	3,94	1,624
31	-11	5	1547	7	6,28	4,09	1,535
31	-18	5	1547	7	4,96	4,08	1,216
35	2	9	1900	5	9,47	5,65	1,676
31	2	9	1250	5	10,40	5,78	1,799
31	2	9	960	5	9,34	5,26	1,776
31	2	9	680	5	9,80	5,24	1,87
35	2	9	250	5	9,40	5,2	1,808

Экспериментальные данные были подвергнуты статистической обработке. Массив собранных показаний аппроксимировался полиномом для выявления закономерностей и степени корреляции с геометрическими параметрами сварного шва. Количество варьируемых параметров и объем выборки позволяют применять уравнение регрессии третьего порядка. Оценка значимости коэффициентов уравнения выполняется с помощью критерия Фишера.

В таблицах 2.8-2.10 представлены результаты оценки значимости коэффициентов регрессионных моделей, описывающих зависимость от глубины, ширины сварного шва и отношения этих параметров соответственно. Полином содержит 5 переменных, которым соответствуют следующие обозначения:

$A = I_{\text{л}}$  – ток луча, мА;

$B = \Delta I_{\phi}$  – отклонение опорного тока фокусировки от значения при максимально остром фокусе, мА;

$C = 2A$  – амплитуда сканирования фокуса, мА;

$D = f$  – частота сканирования, Гц;

$E = v$  – скорость перемещения луча по изделию, мм/с.

Таблица 2.8

	0	1	2	3	4	5
0	"Source"	"SSE"	"DF"	"MSE"	"F"	"p"
1	"Regression"	118.383	8	14.798	15.99	$2.94 \cdot 10^{-12}$
2	"AD"	1.58	1	1.58	1.707	0.196
3	"BE"	2.143	1	2.143	2.315	0.133
4	"BB"	70.043	1	70.043	75.686	$3.627 \cdot 10^{-12}$
5	"ABC"	6.613	1	6.613	7.145	$9.704 \cdot 10^{-3}$
6	"ABD"	3.838	1	3.838	4.147	0.046
7	"ACD"	5.093	1	5.093	5.503	0.022
8	"AAB"	13.53	1	13.53	14.621	$3.193 \cdot 10^{-4}$
9	"CCD"	10.247	1	10.247	11.072	$1.513 \cdot 10^{-3}$
10	"Residual"	54.601	59	0.925	NaN	NaN
11	"Lack of Fit"	54.601	59	0.925	NaN	NaN
12	"Pure Error"	0	0	0	NaN	NaN
13	"Total"	172.984	67	NaN	NaN	NaN

Res4d<sub>8,1</sub> =

Таблица 2.9

	0	1	2	3	4	5
0	"Source"	"SSE"	"DF"	"MSE"	"F"	"p"
1	"Regression"	15.777	8	1.972	10.084	$9.828 \cdot 10^{-9}$
2	"AE"	0.645	1	0.645	3.297	0.075
3	"BC"	0.046	1	0.046	0.235	0.63
4	"BE"	1.448	1	1.448	7.402	$8.548 \cdot 10^{-3}$
5	"BB"	1.795	1	1.795	9.176	$3.635 \cdot 10^{-3}$
6	"ABD"	1.076	1	1.076	5.5	0.022
7	"ACD"	1.532	1	1.532	7.831	$6.926 \cdot 10^{-3}$
8	"CDE"	2.253	1	2.253	11.518	$1.237 \cdot 10^{-3}$
9	"AAB"	2.8	1	2.8	14.318	$3.632 \cdot 10^{-4}$
10	"Residual"	11.539	59	0.196	NaN	NaN
11	"Lack of Fit"	11.539	59	0.196	NaN	NaN
12	"Pure Error"	0	0	0	NaN	NaN
13	"Total"	27.316	67	NaN	NaN	NaN

Res4d<sub>8,1</sub> =

Таблица 2.10

	0	1	2	3	4	5
0	"Source"	"SSE"	"DF"	"MSE"	"F"	"p"
1	"Regression"	2.481	7	0.354	16.597	$5.817 \cdot 10^{-12}$
2	"AD"	0.097	1	0.097	4.564	0.037
3	"CE"	0.073	1	0.073	3.434	0.069
4	"BB"	1.887	1	1.887	88.353	$2.112 \cdot 10^{-13}$
5	"ABC"	0.14	1	0.14	6.538	0.013
6	"ABD"	0.071	1	0.071	3.339	0.073
7	"AAB"	0.081	1	0.081	3.781	0.057
8	"CCD"	0.139	1	0.139	6.502	0.013
9	"Residual"	1.281	60	0.021	NaN	NaN
10	"Lack of Fit"	1.281	60	0.021	NaN	NaN
11	"Pure Error"	0	0	0	NaN	NaN
12	"Total"	3.762	67	NaN	NaN	NaN
13						

Модели, полученные по результатам регрессионного анализа для каждого из трех параметров сварного шва, представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11

Параметр сварного шва	Регрессионная модель	Коэффициент корреляции
H	$Y(I_L, \Delta I_\phi, 2A, f, v) = -1.6 \cdot 10^{-5} \cdot I_L \cdot f - 10^{-2} \cdot \Delta I_\phi \cdot v - 9 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta I_\phi^2 - 2.9 \cdot 10^{-4} \cdot I_L \cdot \Delta I_\phi \cdot 2A - 4.6 \cdot 10^{-7} \cdot I_L \cdot \Delta I_\phi \cdot f + 3.65 \cdot 10^{-6} \cdot I_L \cdot 2A \cdot f + 1.6 \cdot 10^{-4} \cdot I_L^2 \cdot \Delta I_\phi - 6.54 \cdot 10^{-6} \cdot A^2 \cdot f$	0.824
W	$Y(I_L, \Delta I_\phi, 2A, f, v) = -1.4 \cdot 10^{-3} \cdot I_L \cdot v - 6.44 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta I_\phi \cdot 2A - 8.2 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta I_\phi \cdot v - 1.4 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta I_\phi^2 + 2.1 \cdot 10^{-7} \cdot I_L \cdot \Delta I_\phi \cdot f + 4.8 \cdot 10^{-7} \cdot I_L \cdot 2A \cdot f - 3 \cdot 10^{-6} \cdot 2A \cdot f \cdot v + 6.64 \cdot 10^{-5} \cdot I_L^2 \cdot \Delta I_\phi$	0.841
H/W	$Y(I_L, \Delta I_\phi, 2A, f, v) = 2.125 \cdot 10^{-6} \cdot I_L \cdot f + 1.9 \cdot 10^{-3} \cdot 2A \cdot v - 1.4 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta I_\phi^2 - 4.153 \cdot 10^{-5} \cdot I_L \cdot \Delta I_\phi \cdot 2A - 6.756 \cdot 10^{-8} \cdot I_L \cdot \Delta I_\phi \cdot f + 9.678 \cdot 10^{-6} \cdot I_L^2 \cdot \Delta I_\phi - 5.29 \cdot 10^{-6} \cdot 2A^2 \cdot f$	0.813

Полученные регрессионные модели можно использовать для изучения изменения геометрических характеристик шва от изменений параметров процесса ЭЛС [96]. Для этого необходимо оценить степень влияния на конечный результат параметров электронного пучка с осциллирующим фокусом, а именно, амплитуды и частоты сканирования. Далее будет рассмотрено несколько обобщенных выборок при различных значениях параметров для наглядного выявления зависимости геометрических параметров сварного шва от амплитуды и частоты процесса сканирования.

Для иллюстрации на рисунке 2.4 показано изменение глубины проплавления от частоты и амплитуды сканирования для скоростей сварки: 5, 6 и 7 мм/сек. Можно увидеть, что это увеличение скорости приводит к уменьшению глубины швов.

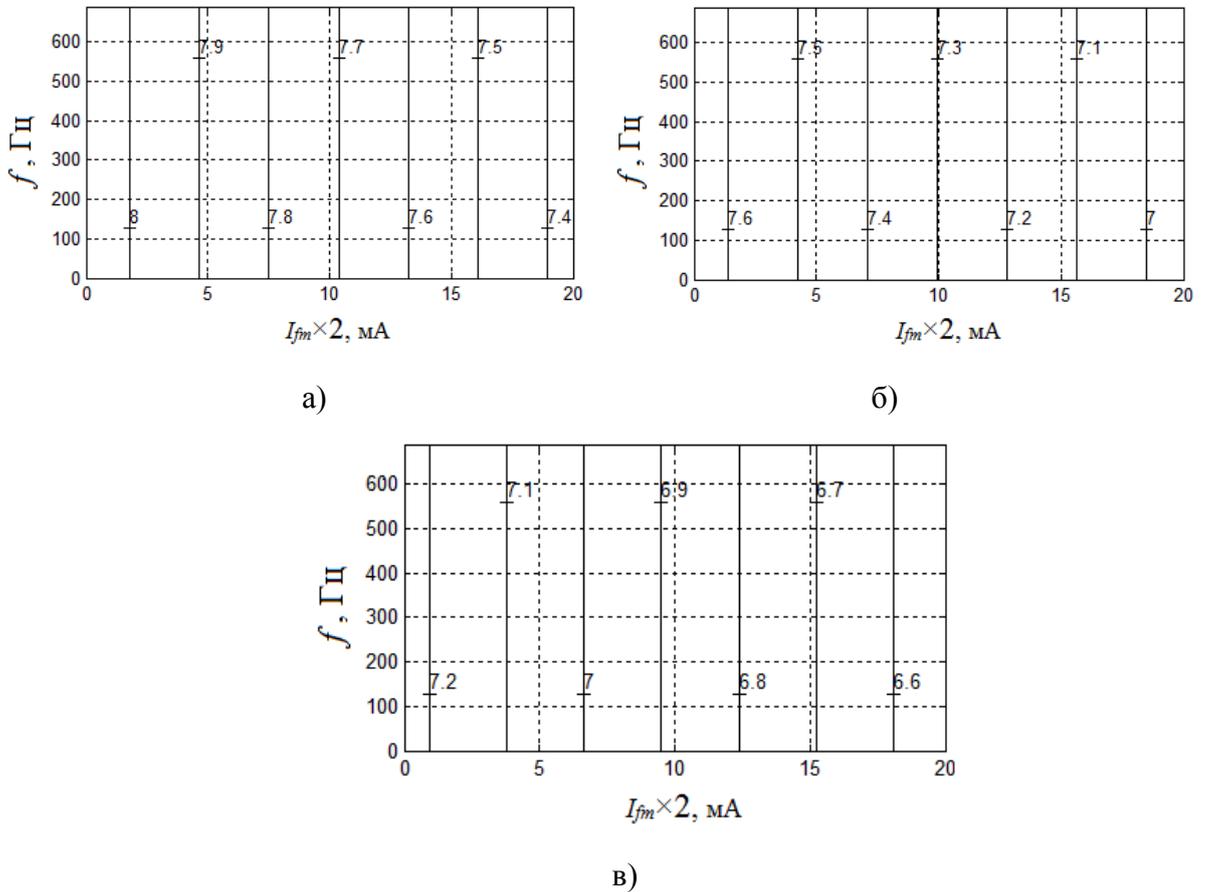


Рисунок 2.4 – изменение глубины сварочных швов от изменения амплитуды тока фокусировки и частоты осцилляций позиции фокуса, при острой фокусировке и скорости сварки: а)  $v=5$  мм/сек, б)  $v=6$  мм/сек, в)  $v=7$  мм/сек.

На рисунке 2.5 можно видеть зависимость глубины проплава от частоты сканирования фокуса при токе луча, равном 35 мА, отклонении от режима острого фокуса – 0, амплитуде сканирования, равной 10 мА и скорости движения луча по заготовке – 5 мм/с. Полученный график в логарифмических координатах позволяет сделать вывод о том, что частота сканирования величиной менее 1 кГц не влияет на глубину сварного шва, но ее повышение приводит к уменьшению данного

параметра. Аналогичные результаты были зарегистрированы при анализе ширины сварного шва и отношении глубины к ширине (рисунок 2.6, 2.7).

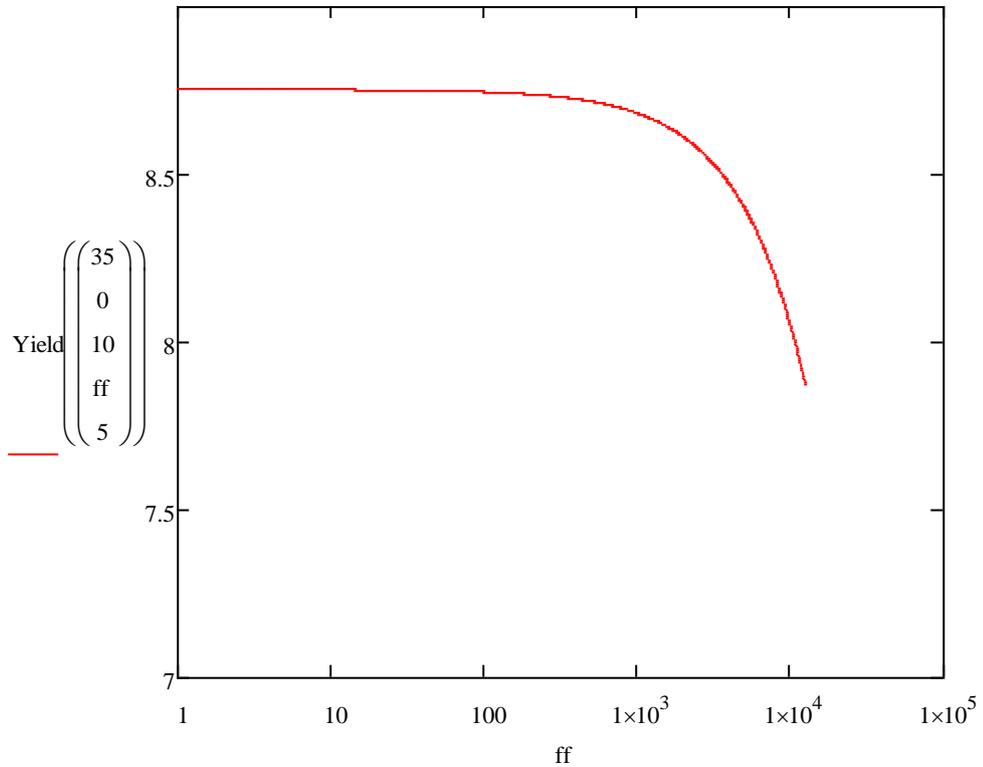


Рисунок 2.5 – зависимость глубины шва от частоты сканирования фокуса.

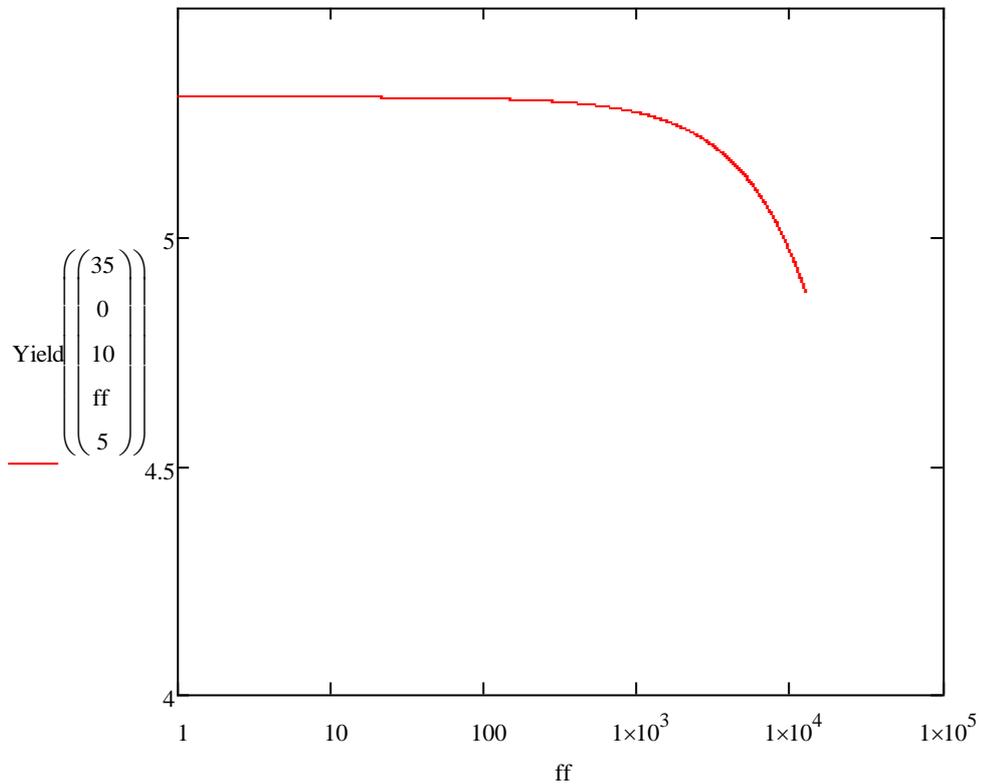


Рисунок 2.6 – зависимость ширины сварного шва от частоты сканирования фокуса.

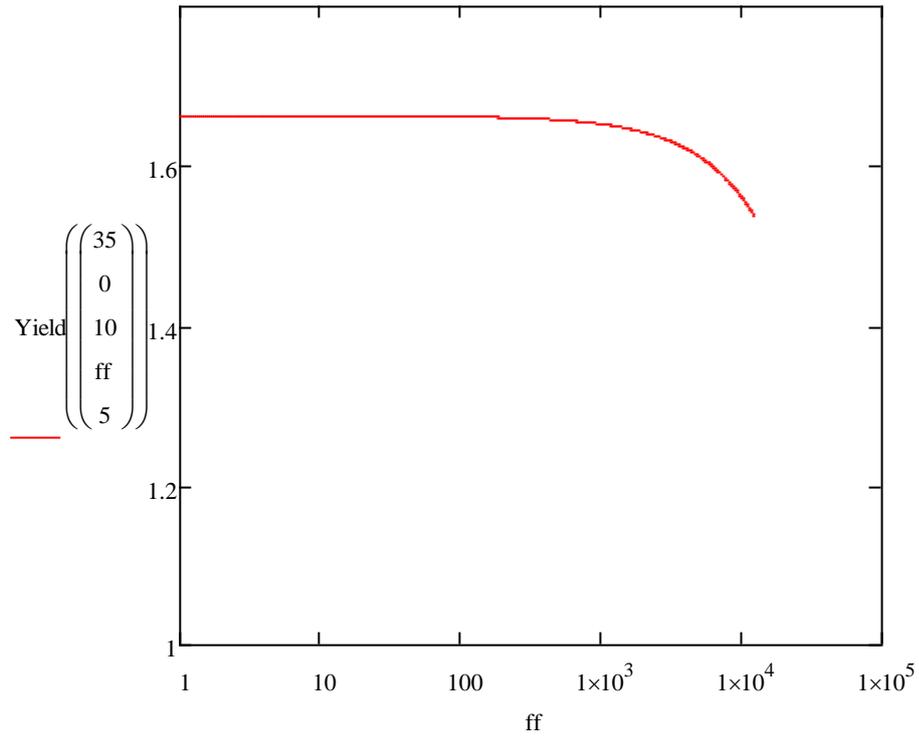


Рисунок 2.7 – отношение глубины к ширине сварного шва при изменении частоты сканирования фокуса.

Влияние амплитуды на перечисленные выше параметры сварного шва можно оценить по графикам, представленным на рисунке 2.8-2.10.

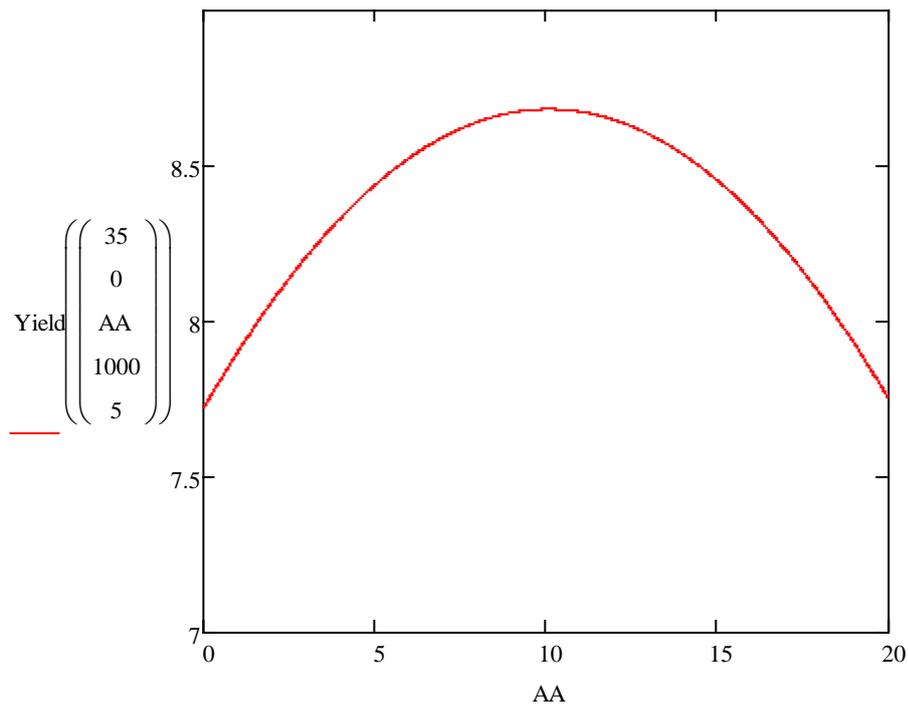


Рисунок 2.8 – зависимость глубины шва от амплитуды сканирования фокуса.

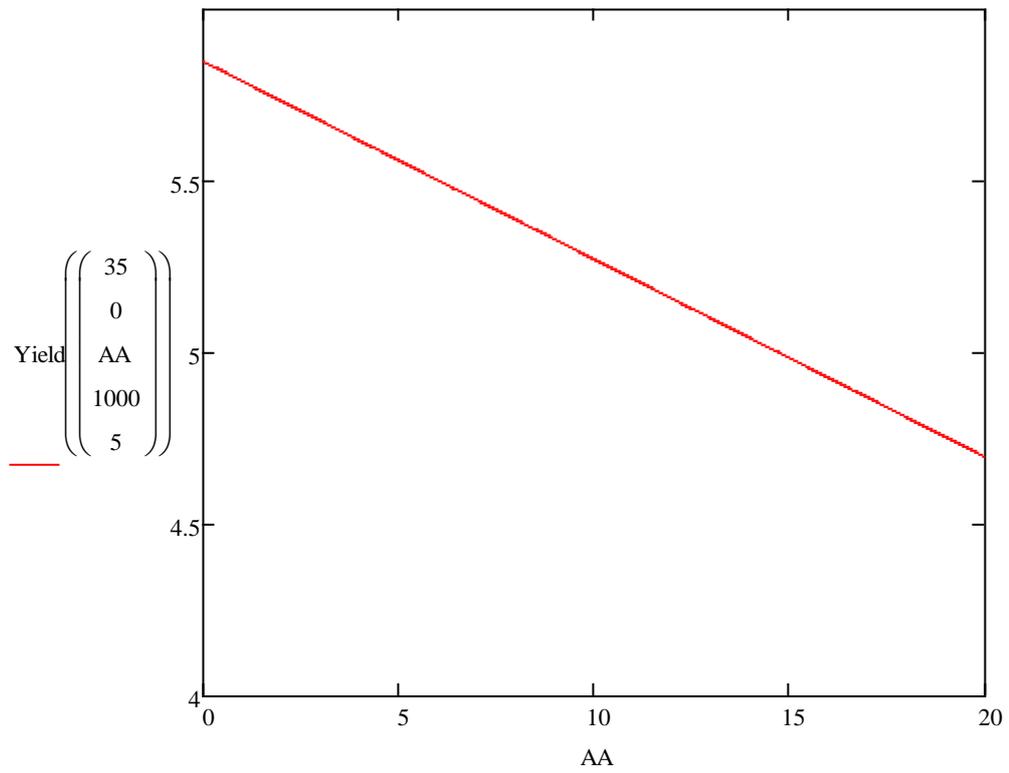


Рисунок 2.9 – зависимость ширины шва от амплитуды сканирования фокуса.

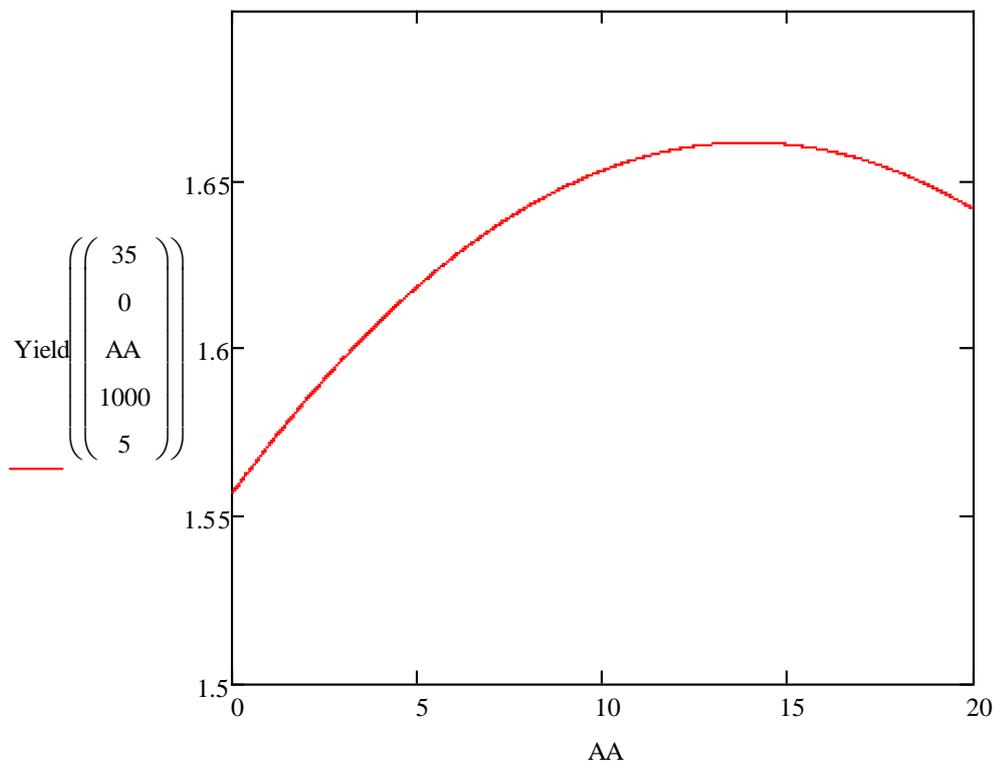


Рисунок 2.10 – отношение глубины к ширине сварного шва при изменении амплитуды сканирования фокуса.

На основе результатов анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что амплитуда сканирования влияет на параметры сварного шва, причем характер этого влияния различен для глубины и ширины, но при этом разброс значений ширины не превышает 20 % при изменении амплитуды от 0 до 20 мА. С точки зрения физики процесса полученный результат вполне предсказуем, но важно было оценить степень воздействия данного параметра на форму канала проплавления.

Поскольку влияние амплитуды сканирования на форму канала проплавления оказалось довольно существенным, необходимо выяснить одинаково ли оно при различных режимах работы, для этого проследим зависимости при различных параметрах  $\Delta I_\phi$  (рисунок 2.11 – 2.13) и  $f$  (рисунок 2.14 – 2.16).

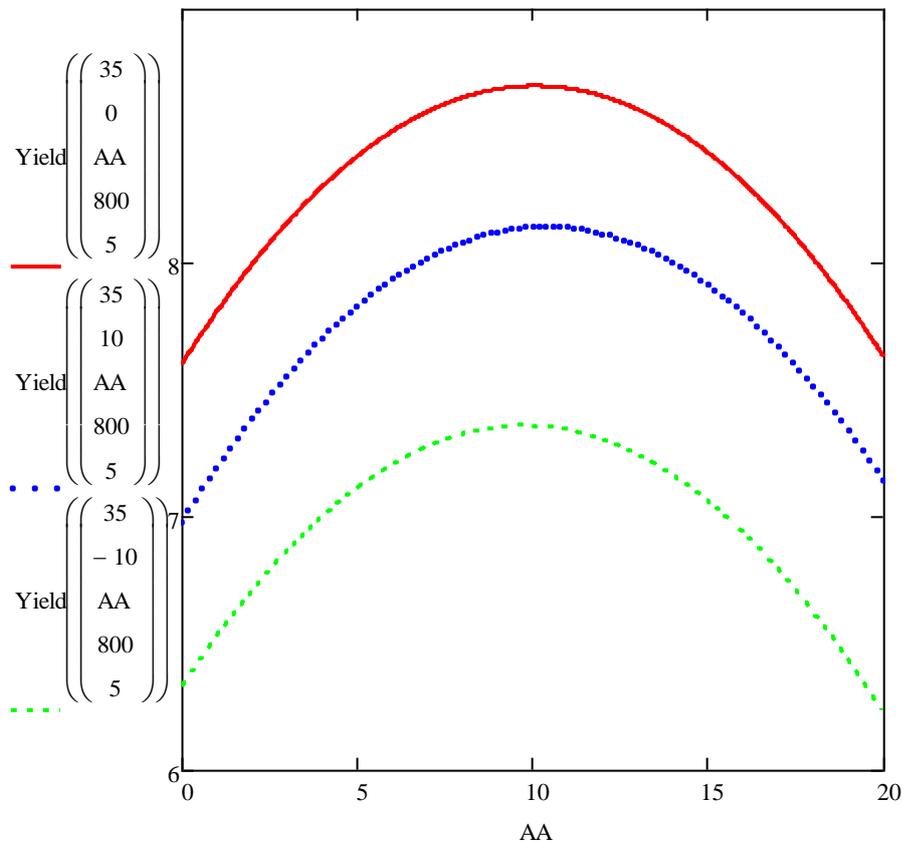


Рисунок 2.11 – зависимость глубины сварного шва от амплитуды сканирования при варьировании  $\Delta I_\phi$ .

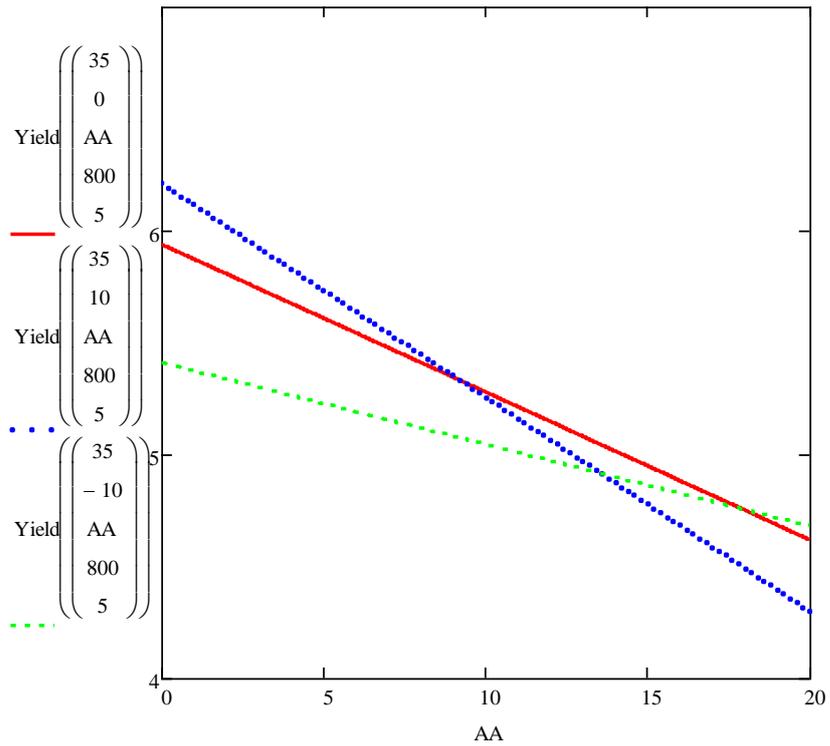


Рисунок 2.12 – зависимость ширины сварного шва от амплитуды сканирования при варьировании  $\Delta I_{\phi}$ .

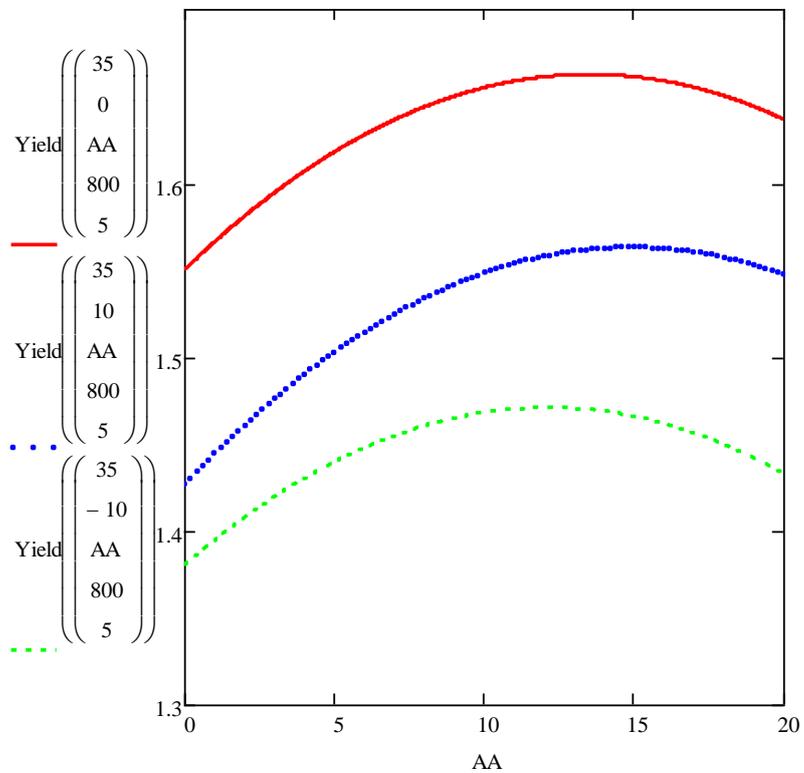


Рисунок 2.13 – отношение глубины к ширине в зависимости от амплитуды сканирования при варьировании  $\Delta I_{\phi}$ .

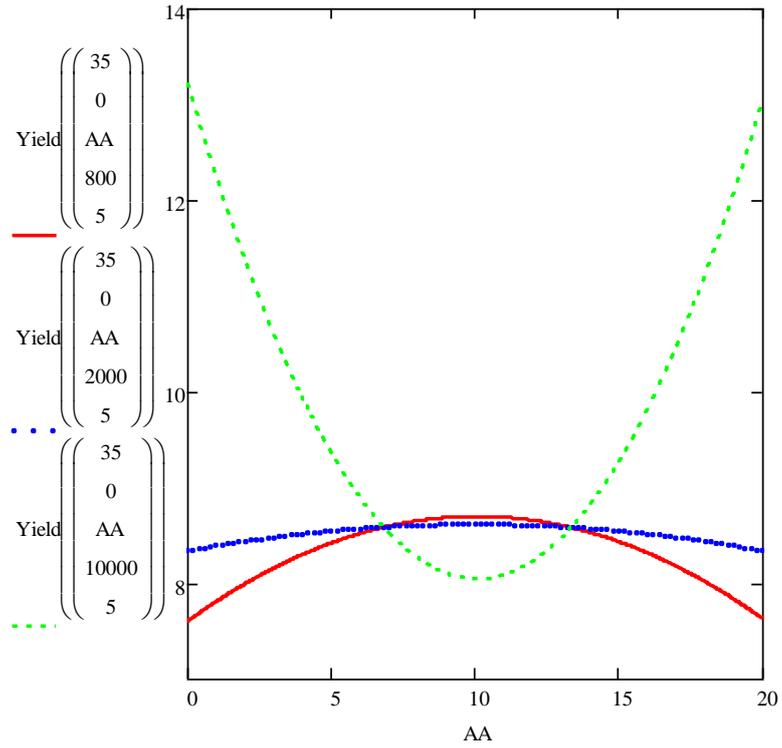


Рисунок 2.14 – зависимость глубины сварного шва от амплитуды сканирования при варьировании частоты сканирования.

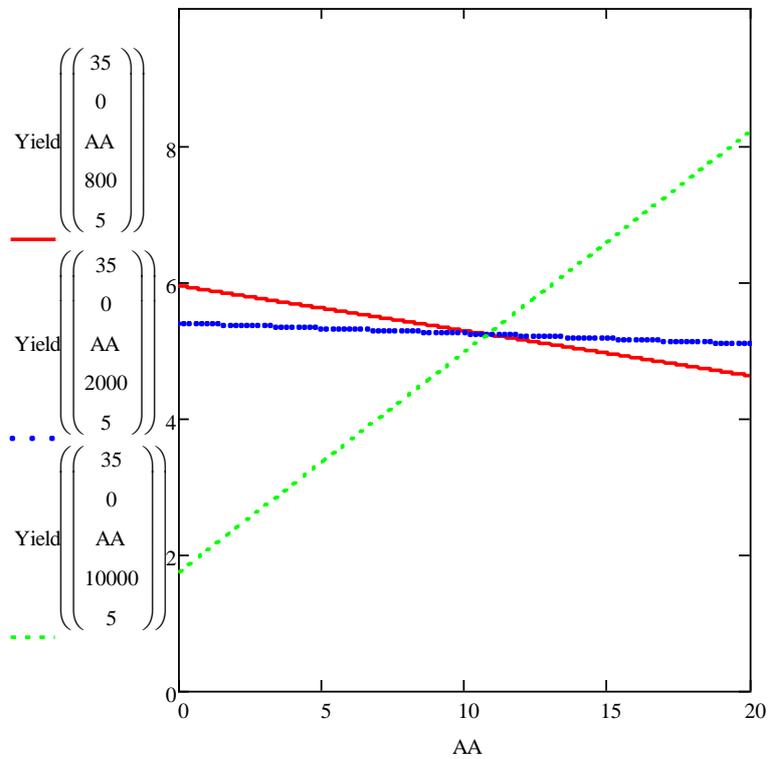


Рисунок 2.15 – зависимость ширины сварного шва от амплитуды сканирования при варьировании частоты.

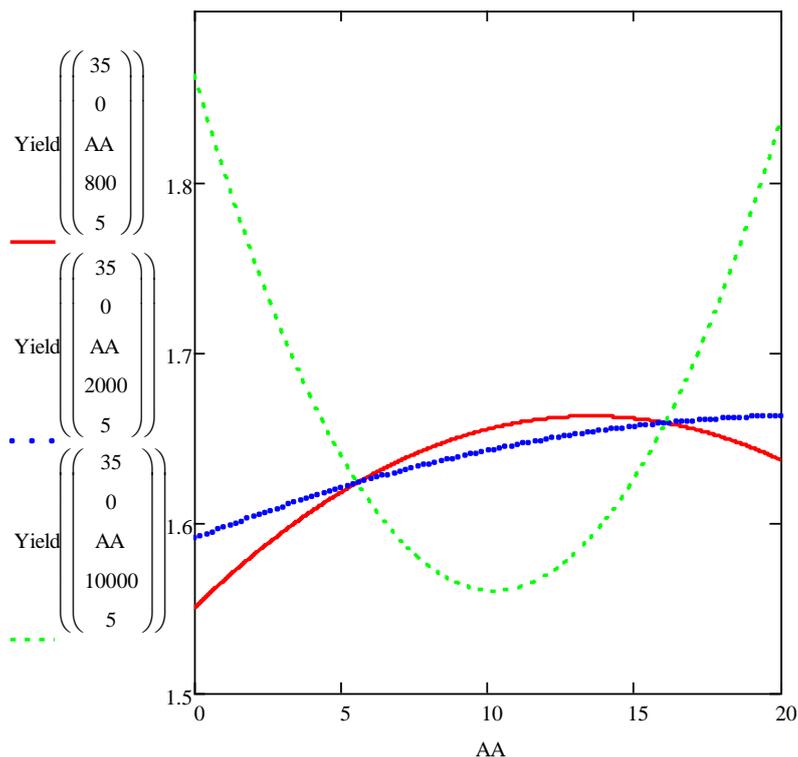


Рисунок 2.16 – отношение глубины к ширине в зависимости от амплитуды сканирования при варьировании частоты.

По форме зависимостей на рисунке 2.14-2.16 можно сделать вывод, что при задании частоты сканирования нужно выбирать значение из диапазона 1 кГц – 2 кГц, поскольку выбор меньших частот, либо намного превышающих данный диапазон способствует усилению степени нелинейности закона изменения формы шва в зависимости от величины амплитуды сканирования, либо увеличивается разброс значений, если характер зависимости близок к линейному.

Основываясь на полученных результатах, можно заключить, что при определенных параметрах процесса сканирования фокуса, данный прием не оказывает существенного влияния на форму канала проплавления. Таким образом, применительно к данному исследованию для контроля положения фокуса были выбраны следующие параметры сканирования:

$$f = 1 \text{ кГц}$$

$$2A = 10 \text{ мА}$$

Процесс сканирования фокуса с данными параметрами не окажет заметного воздействия на форму канала проплавления, но при этом позволит по изменению вторичного тока определить положение фокуса луча

## **2.5 Использование полиномиальной аппроксимации для исследования формирования вторичного сигнала**

Выборка данных, полученная в ходе эксперимента, может быть использована при поиске аппроксимационного полинома, который можно использовать в качестве приближенного математического описания процесса, наиболее подходящего для включения модели в состав технических систем посредством микропроцессорных вычислительных устройств или с использованием комбинационной схемотехники (если требуется достижение максимального быстродействия). Проанализировав экспериментальные данные и выявленные зависимости, можно сделать вывод, что для их аппроксимации можно ограничиться полиномом третьего порядка [97]. Согласно плану эксперимента, имеется 4 варьируемых параметра, которые будут являться переменными полинома:

1. Сила тока луча ( $I_l$ );
2. Отклонение тока фокусировки от значения при максимальной глубине проплава ( $\Delta I_\phi$ );
3. Частота сканирования луча ( $f$ );
4. Амплитуда сканирования фокуса ( $2A$ ).

Имея в распоряжении данные начальные условия, а также массив экспериментальных данных, можно построить полином и оценить его корреляцию с экспериментальной выборкой. Для решения поставленной задачи применялся программный пакет MathCAD, функции `polyfit`, `polyfitstat`. Корреляция оценивалась по нескольким критериям.

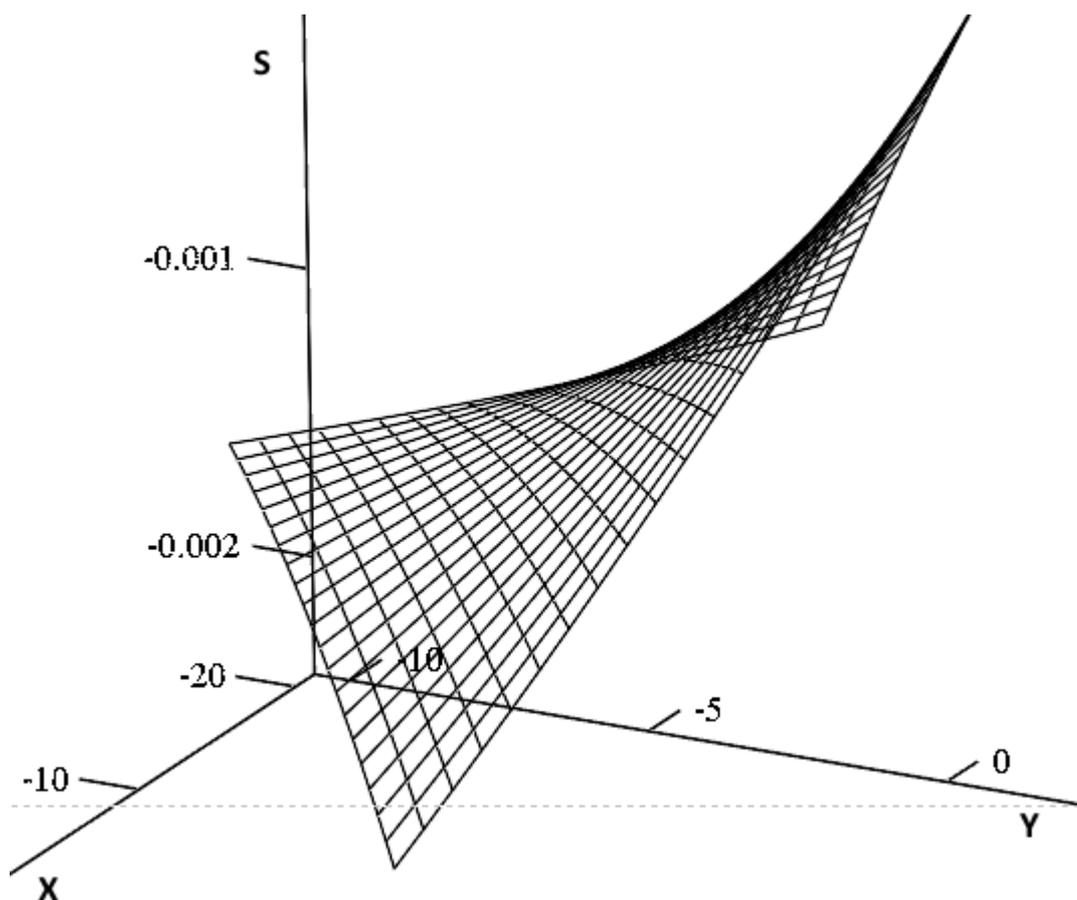


Рисунок 2.17 – Изображение полинома при варьировании амплитуды сканирования луча в пределах [10; 20] мА (ось X) и  $\Delta I_\phi$  в пределах [-5; 5] (ось Y),  $I_n=35$  мА,  $f=1000$  Гц.

В данном случае величина F-критерия составляет 14.595, t-критерия Стьюдента – 0,747, вероятность отказа от гипотезы –  $7.815 \times 10^{-13}$

Оценочные значения степени корреляции позволяют говорить о точности, достаточной для использования аппроксимирующего выражения в качестве модели объекта, но поскольку выборка значений ограничена диапазоном рабочих значений данной сварочной установки, то существует вероятность, что за пределами данного диапазона значения, получаемые с помощью данного полинома не будут соответствовать действительности [98].

Если с помощью полученного полинома проследить за изменением конечной функции при варьировании  $\Delta I_\phi$  и сравнить ее с экспериментальными данными, получаются следующие результаты (рисунок 2.18, 2.19, точками обозначены экспериментальные значения):

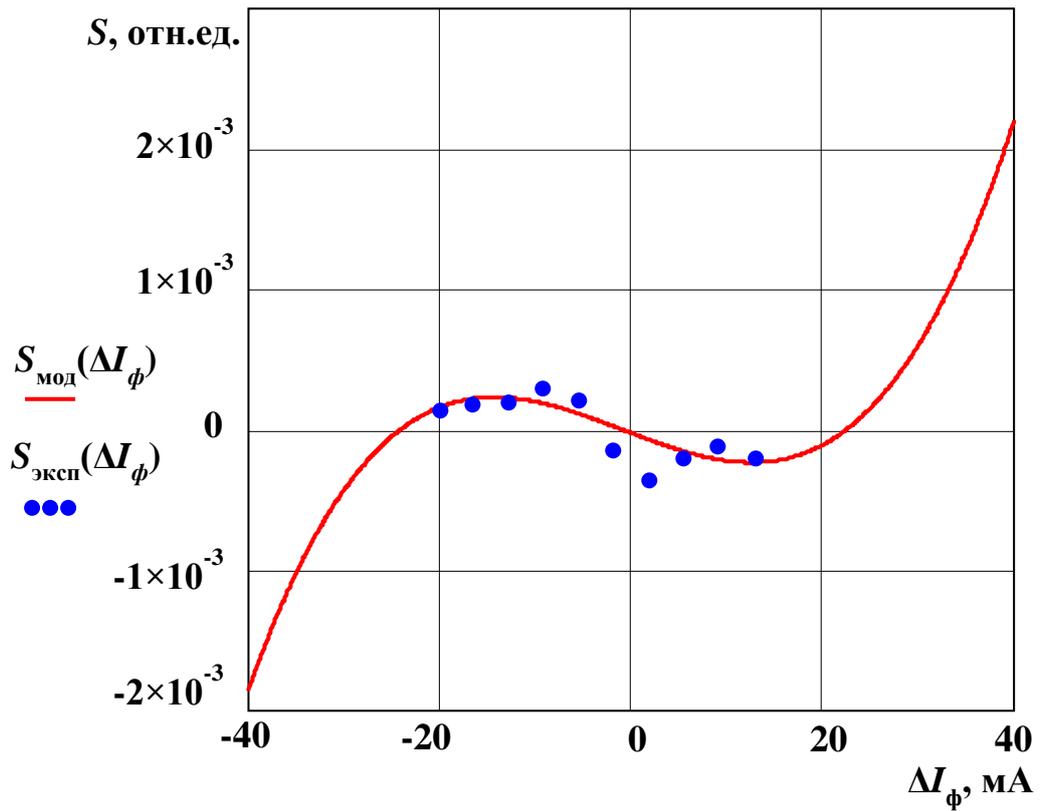


Рисунок 2.18 – Сравнение модели и данных эксперимента при  $I_l=31$  mA,  $2A=10$  mA,  $f=686$  Гц.

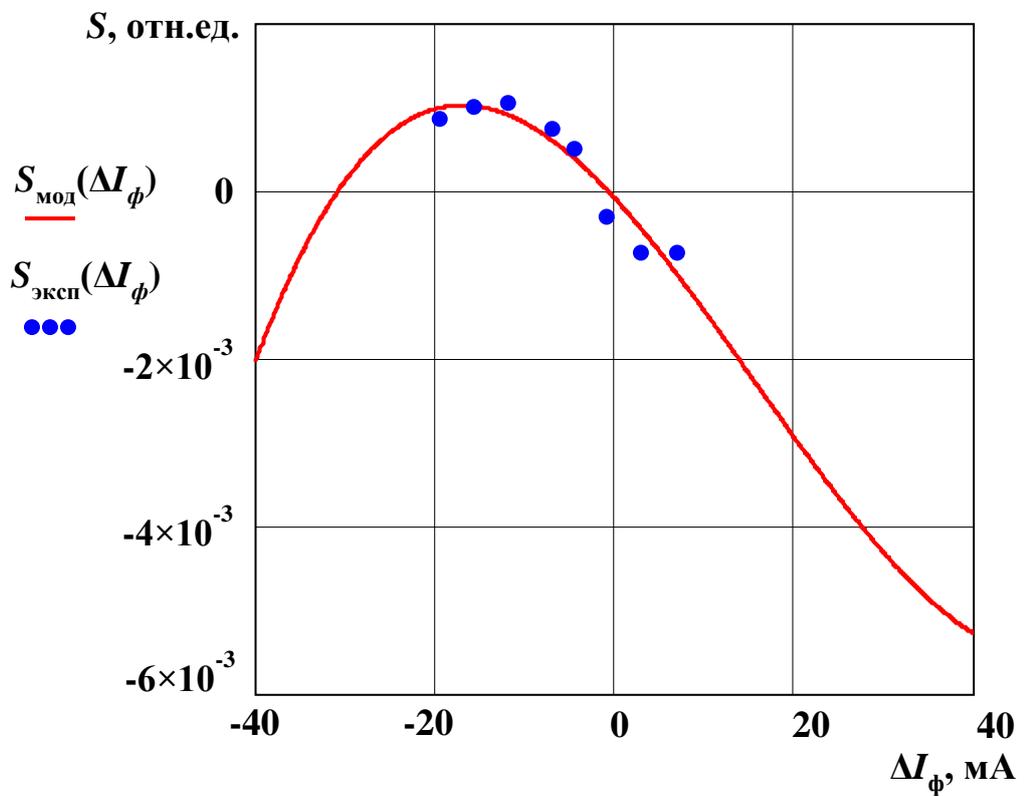


Рисунок 2.19 – Сравнение модели и данных эксперимента при  $I_l=31$  mA,  $2A=20$  mA,  $f=686$  Гц.

Таким образом, найденный полином позволяет достаточно точно представить теоретическую функцию, но только в ограниченном диапазоне (при  $\Delta I_\phi$  в пределах примерно от -30 мА до 30 мА), за пределами данного диапазона значения полинома стремятся к бесконечности, что не соответствует действительности и противоречит физическому смыслу процесса, поэтому далее необходимо решить задачу поиска модельной функции от  $\Delta I_\phi$ , соответствующей реальным характеристикам процесса в широком диапазоне варьирования анализируемого параметра.

Однако, если принять во внимание статическую зависимость тока вторичных электронов от тока фокусировки (2.1), то характеристики, получаемые при интерпретации результатов эксперимента с помощью аппроксимационного полинома 3ей степени, лучше согласуются с физикой процесса (рисунок 2.21, 2.22).

$$S(\Delta I_\phi) = \Delta I_\phi \cdot \exp\left(\frac{-\Delta I_\phi^2}{2 \cdot 10^2}\right) \quad (2.17)$$

В данном случае полином принимает вид (рисунок 2.20):

$$Y = 3.4 \cdot 10^{-3} \cdot S(\Delta I_\phi) - 1.8 \cdot 10^{-4} \cdot I_n \cdot S(\Delta I_\phi) - 1.037 \cdot 10^{-4} \cdot S(\Delta I_\phi) \cdot 2A + 3.407 \cdot 10^{-6} \cdot I_n \cdot S(\Delta I_\phi) \cdot 2A + 2.261 \cdot 10^{-6} \cdot I_n^2 \cdot S(\Delta I_\phi) - 5.189 \cdot 10^{-7} \cdot S(\Delta I_\phi) \cdot (2A)^2$$

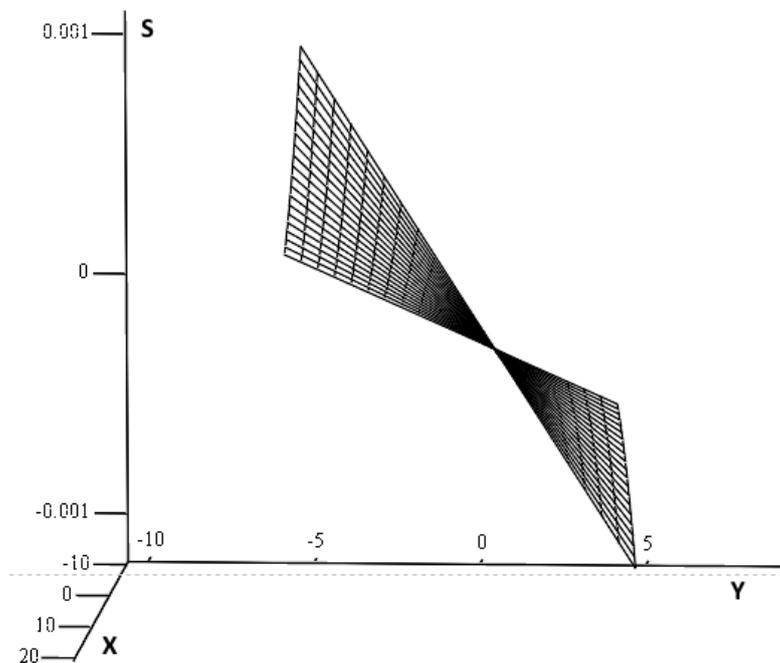


Рисунок 2.20 – Изображение полинома при варьировании амплитуды сканирования луча в пределах [10; 20] мА (ось X) и  $\Delta I_\phi$  в пределах [-5; 5] (ось Y),  $I_n=35$  мА,  $f=1000$  Гц.

В результате величина F-критерия составила 31.896 при вероятности отказа от гипотезы близкой к 0.

После подстановки найденной функции в полином модель можно использовать во всем диапазоне значений  $\Delta I_\phi$ .

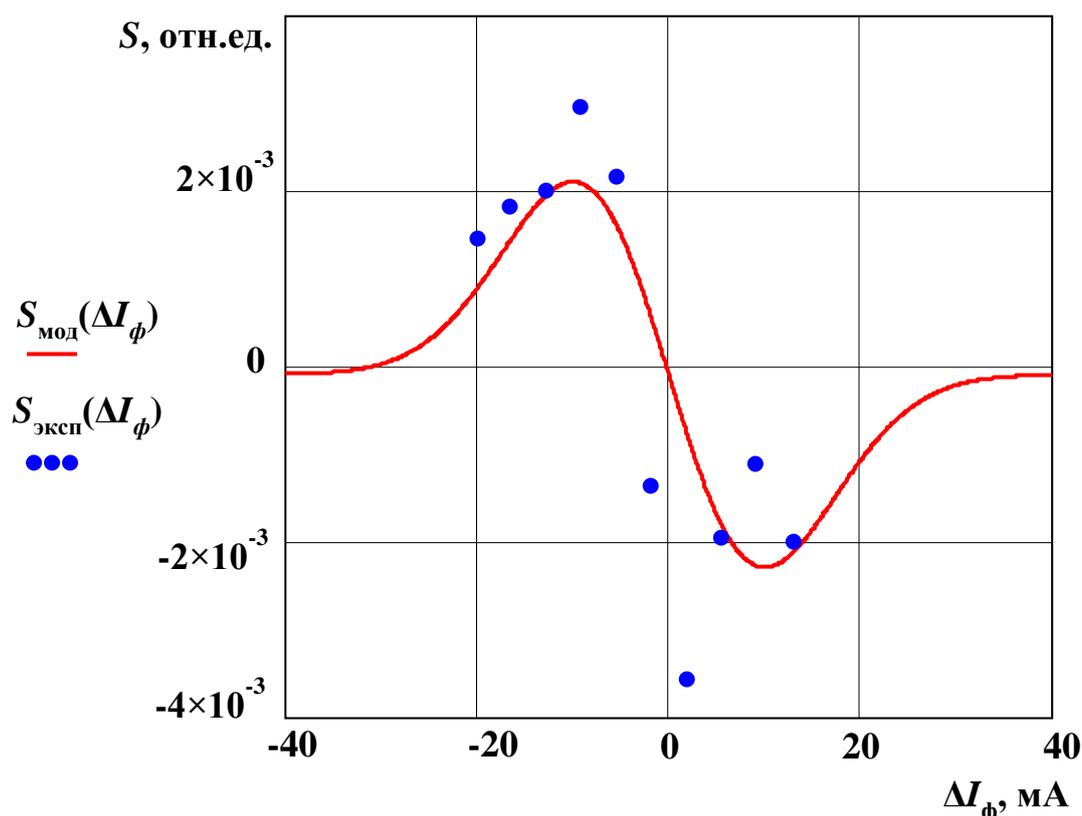


Рисунок 2.21 – Сравнение модели и данных эксперимента при  $I_n=31$  мА,  $2A=10$  мА,  $f=686$  Гц.

Приведенные на рисунке 2.21, 2.22 сопоставления экспериментальных данных с характеристикой, полученной при использовании полинома позволяют сделать вывод о том, что полученная полиномиальная модель адекватно описывает процесс [99-101]. Но полученная зависимость содержит множество параметров – помимо тока фокусировки это амплитуда сканирования и ток луча, что затрудняет применение выражения в качестве модельного в составе технической системы автоматизации. Также большое количество значимых членов полинома не позволяет интерпретировать работу модели с точки зрения физики процесса, что осложняет оценку адекватности полученной модели [102].

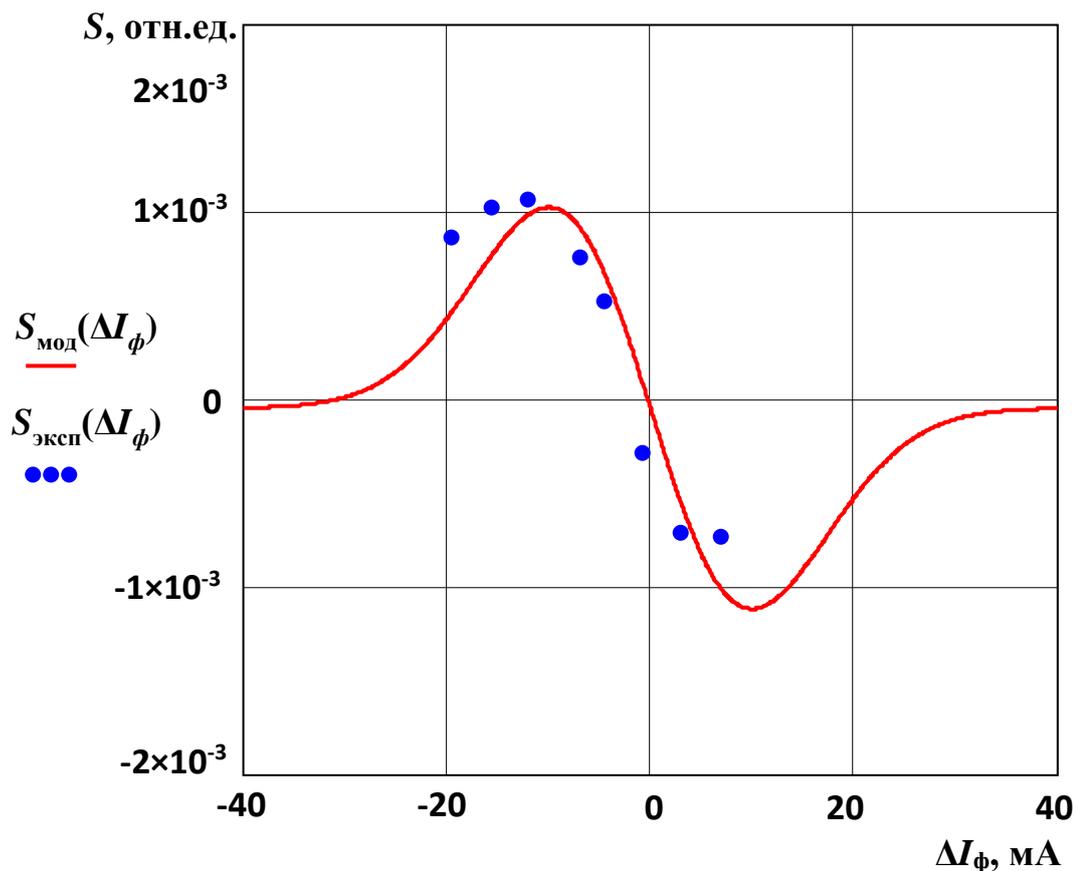


Рисунок 2.22 – Сравнение модели и результатов эксперимента при  $I_d=31$  мА,  $2A=20$  мА,  $f=686$  Гц.

Результаты, полученные в ходе эксперимента и его обработки, позволяют говорить о наличии корреляции между характером изменения высокочастотной составляющей вторичного тока электронов и положением фокуса луча, но стоит отметить, что большое число параметров полинома и, как следствие, сложность его физической интерпретации создают определенные проблемы при использовании полученного выражения в качестве модели. Следовательно, требуется разработка математической модели.

## 2.6 Выводы по главе 2

1. Исследование вторичного тока электронов в плазме потребовало проведения эксперимента по заранее определенному плану, в ходе которого значения

сигнала на различных частотах обрабатывались методом синхронного детектирования. Полученные результаты были сопоставлены с геометрическими параметрами канала проплавления, выявлены закономерности, позволяющие говорить о взаимосвязи положения фокуса с параметрами высокочастотной составляющей сигнала вторичного тока электронов.

2. Анализ влияния процесса сканирования фокуса на форму канала проплавления позволил определить параметры, при которых этот процесс не оказывает заметного воздействия на конечный результат, что позволяет использовать прием сканирования фокуса при построении системы управления фокусировкой.

3. Для математического описания выявленных закономерностей был применен метод полиномиальной аппроксимации. Полученное выражение достаточно точно соотносилось с экспериментальными результатами в исследуемом диапазоне значений (при  $\Delta I_{\phi}$  в пределах примерно от -30 мА до 30 мА), но также содержало значимые члены, привносящие в модель зависимость не только от тока фокусировки, но и от других параметров (ток луча, амплитуда сканирования). При этом за пределами исследованного диапазона значения аппроксимационного полинома не соответствовали физическому смыслу, следовательно, на следующем этапе исследования требуется создание точной математической модели.

## ГЛАВА 3

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОКУСИРОВКОЙ

По результатам исследований, описанных во второй главе, установлена взаимосвязь между фокусировкой электронного луча и сигналом вторичного тока.

#### 3.1 Математическая модель датчика вторичного тока

##### 3.1.1 Представление в виде ряда Фурье

Зависимость анализируемого параметра (амплитуда высокочастотных колебаний вторичного тока) можно представить функцией Гаусса:

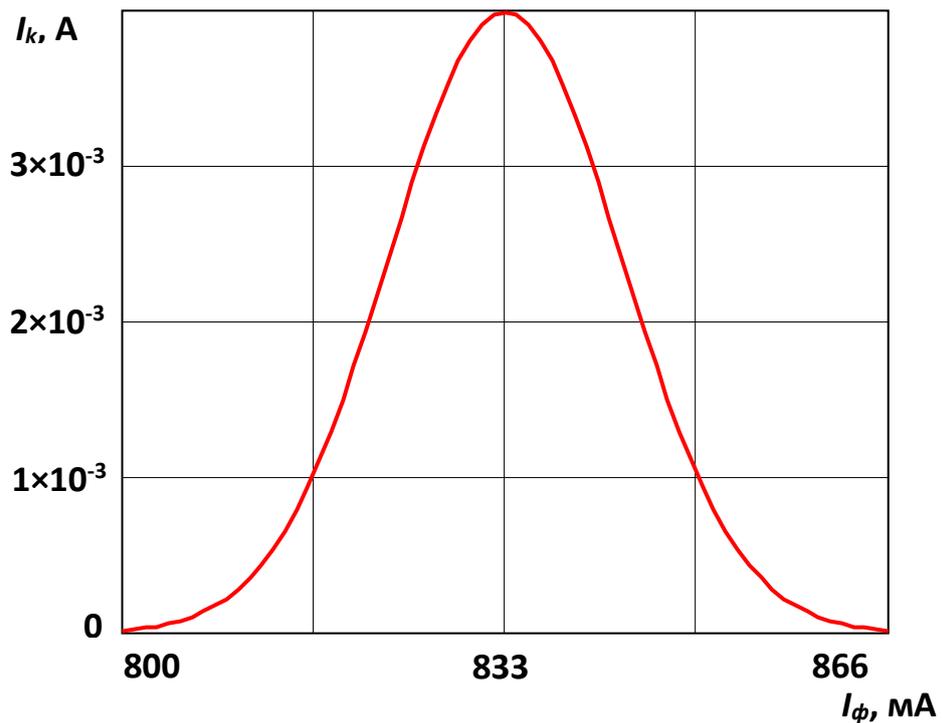


Рисунок 3.1 Зависимость амплитуды высокочастотных колебаний вторичного тока в плазме от тока фокусирующей системы, аппроксимированная нормальной функцией ( $I_k$  – ток коллектора, мА;  $I_\phi$  – ток фокусирующей системы, мА).

$$I_k = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(I_\phi - I_{\phi ext})^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

где  $K$  – некоторый коэффициент пропорциональности;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение вторичного сигнала;  $I_\phi$  – ток фокусировки;  $I_{\phi ext}$  – значение тока фокусировки при максимальной глубине канала.

Поскольку необходимым условием работы предлагаемого в работе метода определения положения фокуса луча является выполнение сканирования фокуса в процессе сварки, данный процесс должен учитываться математической моделью. Следовательно, необходимо описать гармонические колебания тока фокусировки в соответствии с выражением:

$$I_\phi = \langle I_\phi \rangle + I_{\phi m} \sin \omega \cdot t \quad (3.2)$$

где  $I_{\phi m}$  – максимальная амплитуда отклонения;  $\langle I_\phi \rangle$  – среднее значение тока фокусировки;  $\omega$  – частота колебаний;  $t$  – время.

Формула (3.1) примет вид

$$I_k(\alpha) = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\langle I_\phi \rangle + I_{\phi m} \sin \alpha - I_{\phi ext})^2}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

где  $\alpha = \omega t$ .

Введем обозначение

$$\Delta I_\phi = \langle I_\phi \rangle - I_{\phi ext} \quad (3.4)$$

где  $\Delta I_\phi$  – отклонение фокуса от значения, при котором глубина канала проплавления является максимальной.

$$I_k(\alpha) = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta I_\phi + I_{\phi m} \sin \alpha)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.5)$$

$$I_k(\alpha) = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta I_\phi)^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{\Delta I_\phi I_{\phi m} \sin \alpha}{\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{I_{\phi m}^2 \sin^2 \alpha}{2\sigma^2}} \quad (3.6)$$

Введем обозначения всех членов, не зависящих от  $\alpha$ :

$$A = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta I_\phi)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.7)$$

$$L = -\frac{\Delta I_\phi I_{\phi m}}{\sigma^2} \quad (3.8)$$

$$P = -\frac{I_{\phi m}^2}{2\sigma^2} \quad (3.9)$$

Тогда изменение вторичного сигнала во времени (3.2) можно представить в виде кратного ряда Фурье от одной переменной:

$$I_k(\alpha) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m e^{jm\alpha} \quad (3.10)$$

где коэффициенты ряда определяются формулой

$$C_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) e^{-jm\alpha} d\alpha \quad (3.11)$$

С учетом (3.4) получаем

$$C_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta I_\phi + I_{\phi m} \sin \alpha)^2}{2\sigma^2}} \times e^{-jm\alpha} d\alpha \quad (3.12)$$

Соотношения (3.10) и (3.12) представляют математическую модель датчика вторичного сигнала, как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодической составляющей в параметрах электронного пучка. Математическая модель позволяет выявить составляющие сигнала датчика с частотами  $m\alpha$ , где  $m$  – целое число. На данном этапе уже можно оценить форму этих частотных составляющих с помощью программных средств математического анализа [103,104]. Графическое представление данных составляющих приведено на Рисунок 3.2.

В тригонометрической форме (3.10) будет иметь вид:

$$I_k(\alpha) = \frac{d_0}{2} + 4 \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m \cos(m\alpha) + b_m \sin(m\alpha) \quad (3.13)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$d_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) d\alpha \quad (3.14)$$

$$d_m = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \cos(m\alpha) d\alpha \quad (3.15)$$

$$b_m = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \sin(m\alpha) d\alpha \quad (3.16)$$

Тогда с учетом (3.7) – (3.9):

$$d_0 = \frac{A}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{L \sin \alpha + P \sin^2 \alpha} d\alpha$$

$$d_m = \frac{A}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{L \sin \alpha + P \sin^2 \alpha} \cdot \cos m\alpha d\alpha$$

$$b_m = \frac{A}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{L \sin \alpha + P \sin^2 \alpha} \cdot \sin m\alpha d\alpha$$

В этом случае

$$C_m = \frac{1}{2}(d_m - jb_m) \quad (3.17)$$

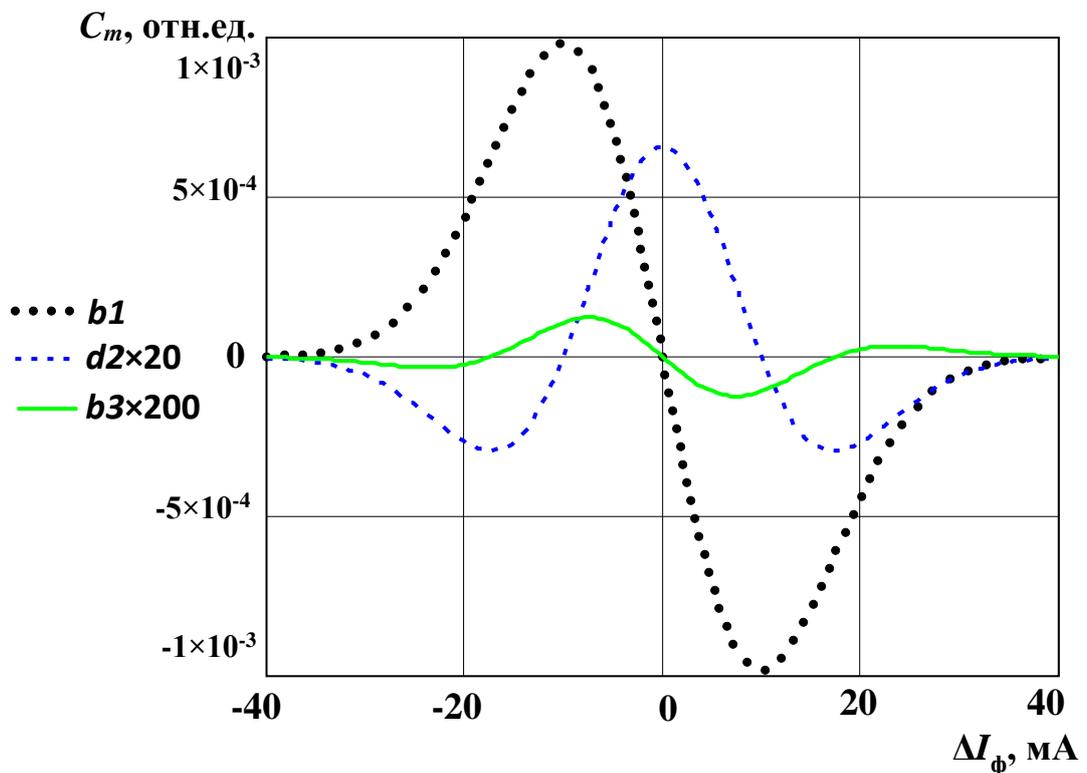


Рисунок 3.2 – Зависимость четных ( $d_2$ ) и нечетных ( $b_1, b_2$ ) гармоник от фокусировки.

Таким образом, исследуемый сигнал можно представить суммой постоянной и гармонических составляющих. Если сканирование по  $\Delta I_\phi$  отсутствует, то ряды вырождаются в соотношение (3.3).

### 3.1.2 Получение аппроксимирующего выражения ряда Фурье

Интерес представляет определение спектральных составляющих, зависящих от положения фокуса относительно поверхности свариваемого изделия. Для получения этих составляющих воспользуемся соотношением (3.1). Получение аналитического выражения интеграла, входящего в формулу, затруднено, поэтому представим подынтегральное выражение в виде ряда Маклорена [105] по степеням  $x$ , где  $x = L\sin\alpha + P\sin^2\alpha$ :

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} \quad (3.18)$$

С достаточной для практики точностью можно ограничиться пятью членами ряда. Такое ограничение допустимо при  $|x| < \sigma$  и характерно для описываемых процессов.

Тогда получим:

$$\begin{aligned} e^x = & 1 + L\sin\alpha + \left(P + \frac{L^2}{2}\right)\sin^2\alpha + \left(LP + \frac{L^3}{6}\right)\sin^3\alpha + \\ & + \left(\frac{P^2}{2} + \frac{L^2P}{2}\right)\sin^4\alpha + \frac{LP^2}{2}\sin^5\alpha + \frac{P^3}{6}\sin^6\alpha \end{aligned}$$

Далее необходимо посчитать коэффициенты ряда Фурье:

$$\begin{aligned} d_0 = & \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_K(\alpha) d\alpha = \\ = & \frac{A}{8} \left( \frac{5P^3}{24} + 3P^2 + L^2(1+3P) + 2P + 4 \right) = \frac{K}{8\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta I_\phi^2}{2\sigma^2}} \cdot \\ \cdot & \left( 4 - \frac{5I_{\phi m}^6 + 288\Delta I_\phi^2 I_{\phi m}^4}{192\sigma^6} + \frac{4\Delta I_\phi^2 I_{\phi m}^2 + 3I_{\phi m}^4}{4\sigma^4} - \frac{I_{\phi m}^2}{\sigma^2} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_K(\alpha) \sin \alpha d\alpha = AL \left( \frac{1}{2} + \frac{3P}{8} + \frac{L^2}{16} + \frac{5P^2}{32} \right) = \\
&= \frac{K\Delta I_{\phi} I_{\phi m}}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta I_{\phi}^2}{2\sigma^2}} \cdot \left( \frac{3I_{\phi m}^2}{16\sigma^2} - \frac{8\Delta I_{\phi}^2 I_{\phi m}^2 + 5I_{\phi m}^2}{128\sigma^4} - \frac{1}{2} \right)
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned}
d_1 &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_K(\alpha) \cos \alpha d\alpha = \frac{A}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \alpha + L \sin \alpha \cos \alpha + \left( P + \frac{L^2}{2} \right) \sin^2 \alpha \cos \alpha + \\
&+ \left( LP + \frac{L^3}{6} \right) \sin^3 \alpha \cos \alpha + \dots d\alpha = \frac{A}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \alpha d\alpha + L \int_{-\pi}^{\pi} \sin \alpha d \sin \alpha + \\
&+ \left( P + \frac{L^2}{2} \right) \int_{-\pi}^{\pi} \sin^2 \alpha d \sin \alpha + \left( LP + \frac{L^3}{6} \right) \int_{-\pi}^{\pi} \sin^3 \alpha d \sin \alpha + \dots = 0
\end{aligned} \tag{3.21}$$

В итоге сигнал, представленный рядом Фурье, будет иметь вид

$$I_k(\alpha) = \frac{d_0}{2} + b_1 \sin \alpha \tag{3.22}$$

где коэффициенты  $d_0$ ,  $b_1$  определяются выражениями (3.19)..(3.21).

Анализ выражений (3.19)..(3.22) свидетельствует о том, что при сканировании фокуса в спектре сигнала датчика присутствуют составляющие, амплитуды которых зависят от величины отклонения тока фокусировки от значения при максимальной глубине канала проплавления [106].

Для оценки точности математической модели также был применен критерий Фишера, величина которого составила 27,4 при вероятности отказа от гипотезы, равной  $0.16 \times 10^{-8}$ .

Таким образом можно заключить, что математическое описание модели адекватно описывает взаимосвязь между фокусировкой электронного луча и функциональными зависимостями на определенных частотах сигнала тока вторичных электронов. А именно ценность представляют гармоники  $b_1$  и  $d_2$ , представленные

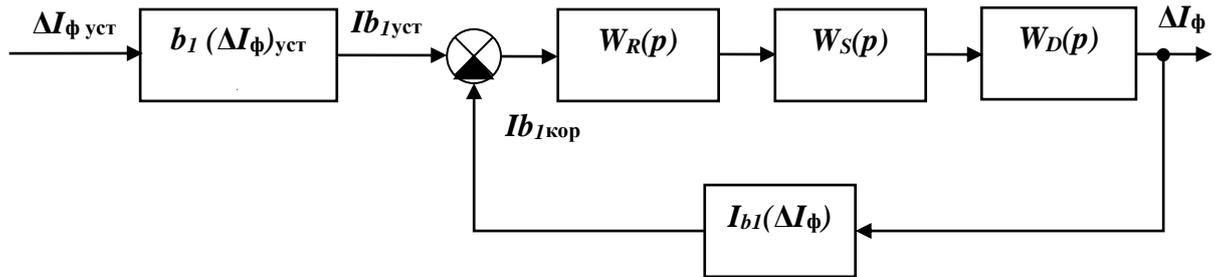
на Рисунок 3.2. Первая гармоника имеет наибольшую амплитуду, а также выраженную зависимость знака от режима фокусировки (перефокусированный режим – отрицательный знак, недофокусированный – положительный), кроме того при определенных условиях ( $-10 < \Delta I_{\phi} < 10$  мА) зависимость принимает линейный характер. Вторая гармоника имеет точку экстремума при острой фокусировке, что позволяет использовать ее в качестве информационного параметра при использовании специальных методов регулирования, связанных с поиском данной точки.

По результатам раздела можно заключить, что на данном этапе получена математическая модель датчика вторичного излучения. Спектральный анализ обрабатываемого сигнала позволил выявить ряд гармоник, которые несут в себе информацию о положении фокуса относительно поверхности канала проплавления, и, следовательно, анализ сигнала на данных частотах позволяет в режиме реального времени контролировать параметр фокусировки электронного луча. Использование данного датчика в составе локальной системы управления (ЛСУ) ЭЛС позволит решить задачу поддержания оптимального значения фокуса непосредственно в процессе сварки.

### **3.2 Имитационная модель системы управления**

После того, как найдено математическое описание датчика вторичных электронов, необходимо задействовать его в контуре системы управления, разработка которого обычно также начинается с этапа моделирования. При создании модели системы управления необходимо опираться на основы теории автоматического управления (ТАУ) [107], помимо этого процесс моделирования можно значительно ускорить, если использовать программные пакеты, такие как Matlab. Разработка имитационной модели системы управления фокусировкой луча велась с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета Matlab. На рисунке представлена структурная схема системы автоматического регулирования положения фокуса луча.

$W_s(p)$  – передаточная функция фокусирующей катушки;  $W_R(p)$  – передаточная функция регулятора;  $W_D(p)$  – передаточная функция датчика;  $I_k$  – ток коллектора электронов;  $I_\phi$  – ток фокусировки;  $\Delta I_\phi$  – отклонение тока фокусировки от значения, при котором достигается максимальная глубина канала проплавления;  $I_{\phi \text{ кор}}$  – корректирующее воздействие на ток фокусировки.



$W_s(p)$  – передаточная функция фокусирующей катушки;  $W_R(p)$  – передаточная функция регулятора;  $W_D(p)$  – передаточная функция датчика;  $I_{bI}$  – анализируемая составляющая сигнала вторичного тока;  $I_\phi$  – ток фокусировки;  $\Delta I_\phi$  – отклонение тока фокусировки от значения при максимально остром фокусе;  $I_{bI \text{ кор}}$  – корректирующее воздействие.

Рисунок 3.3 – структурная схема системы управления фокусировкой

Каждый элемент характеризуется своими параметрами с точки зрения ТАУ. Звено ПИД-регулятора  $W_R$  описывается следующей передаточной функцией:

$$W_R(p) = K_p \left( 1 + \frac{K_I}{p} + K_D p \right),$$

где  $K_p = 2$  – коэффициент пропорциональной составляющей;

$K_I = 10$  – коэффициент интегральной составляющей;

$K_D = 0.01$  – коэффициент дифференциальной составляющей.

Данные значения коэффициентов получены в ходе настройки регулятора методом Зиглера-Никольса.

Также в контур управления током фокусировки входит отклоняющая катушка с усилителем тока. Подобный тракт с точки зрения ТАУ обычно представляется аperiodическим звеном первого порядка с передаточной функцией вида

$$W_S(p) = \frac{K_S}{T_S p + 1},$$

где  $K_S = 1$  – коэффициент усиления тракта;

$T_S = 0,1$  с – постоянная времени тракта фокусировки.

Помимо данных элементов в контуре управления также стоит учесть особенности датчика вторичного тока электронов, в схеме которого реализуется метод синхронного детектирования, который подразумевает использование на выходе фильтров низких частот с частотой среза  $\omega_0 \ll \omega$ . Следовательно, в терминах ТАУ переходную характеристику датчика необходимо аппроксимировать апериодическим звеном второго порядка:

$$W_D(p) = \frac{1}{T_1 p^2 + T_2 p + 1},$$

где  $T_1 = 0.0009$  с;

$T_2 = 0.14$  с.

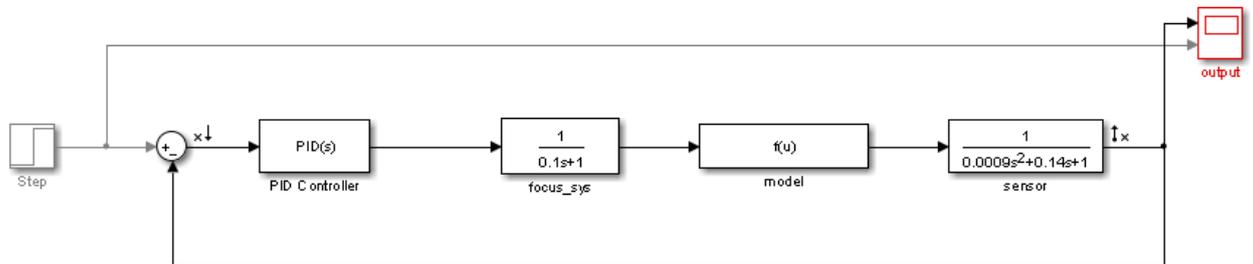


Рисунок 3.4 – модель системы управления в среде Simulink.

С помощью надстройки Simulink программного пакета Matlab был выполнен анализ устойчивости и динамических характеристик системы управления. Переходная характеристика системы (реакция на ступенчатый сигнал) приводится на рисунке 3.5. Согласно полученной характеристике длительность переходного процесса составляет 0.4 с, что является приемлемым быстродействием для технологического процесса ЭЛС. Величина перерегулирования составила примерно 15%, что также находится в допустимых пределах для процесса сварки. Статическая составляющая ошибки регулирования не превысила 0.05 %.

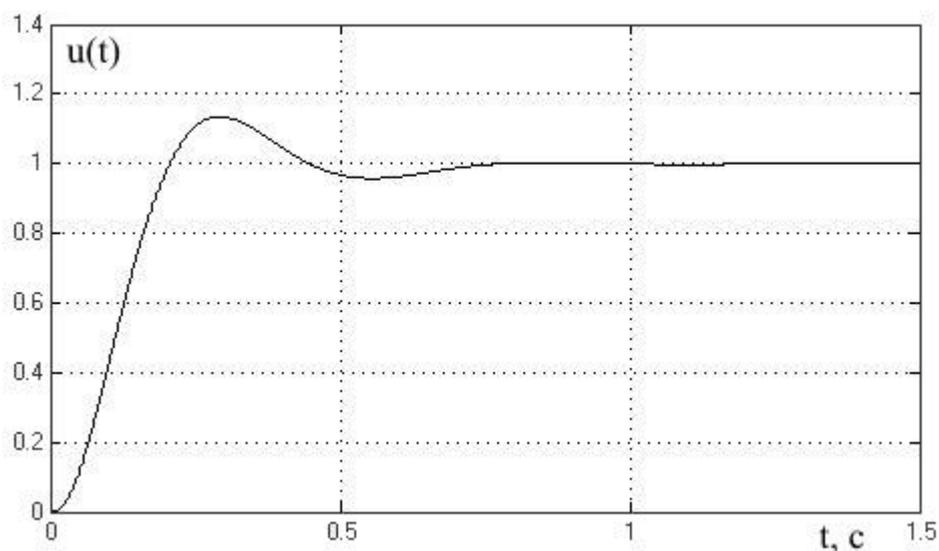


Рисунок 3.5 – переходная характеристика системы управления фокусировкой.

Для анализа устойчивости исследуемую систему необходимо разомкнуть и построить ее амплитудно-частотную характеристику [108]. АЧХ в логарифмической системе координат для исследуемой системы представлена на рисунке 3.6. Согласно данной характеристике можно утверждать, что замкнутая система управления фокусировкой луча будет устойчивой с запасом, который можно оценить следующими параметрами:

- запас устойчивости по амплитуде = 22.5 дБ
- запас устойчивости по фазе = 53°

По результатам анализа структурной схемы с точки зрения ТАУ можно заключить, что система является устойчивой, но при технической реализации следует учитывать ограничения, налагаемые математической моделью, при которых каждому значению тока фокусировки соответствует единственное значение конечной функции. Метод позволяет осуществлять регулирование тока фокусировки поддержанием значения результата синхронного детектирования  $b_1$  на постоянном уровне, соответствующем определенной величине удельной мощности электронного луча. При этом возможно как поддержание нулевого значения отклонения тока фокусировки от острой, так и ненулевого отклонения в некотором диапазоне. Диапазон устойчивой работы системы в общем случае ограничен

начальной величиной отклонения тока фокусировки от острого значения. Величина этого отклонения не должна выходить за пределы области монотонного изменения сигнала  $b_1$  (Рисунок 3.2). Для электронно-лучевых пушек конструкции ИЭС им. Е.Патона этот диапазон составляет  $\Delta I_f \in (-15,15)$  мА.

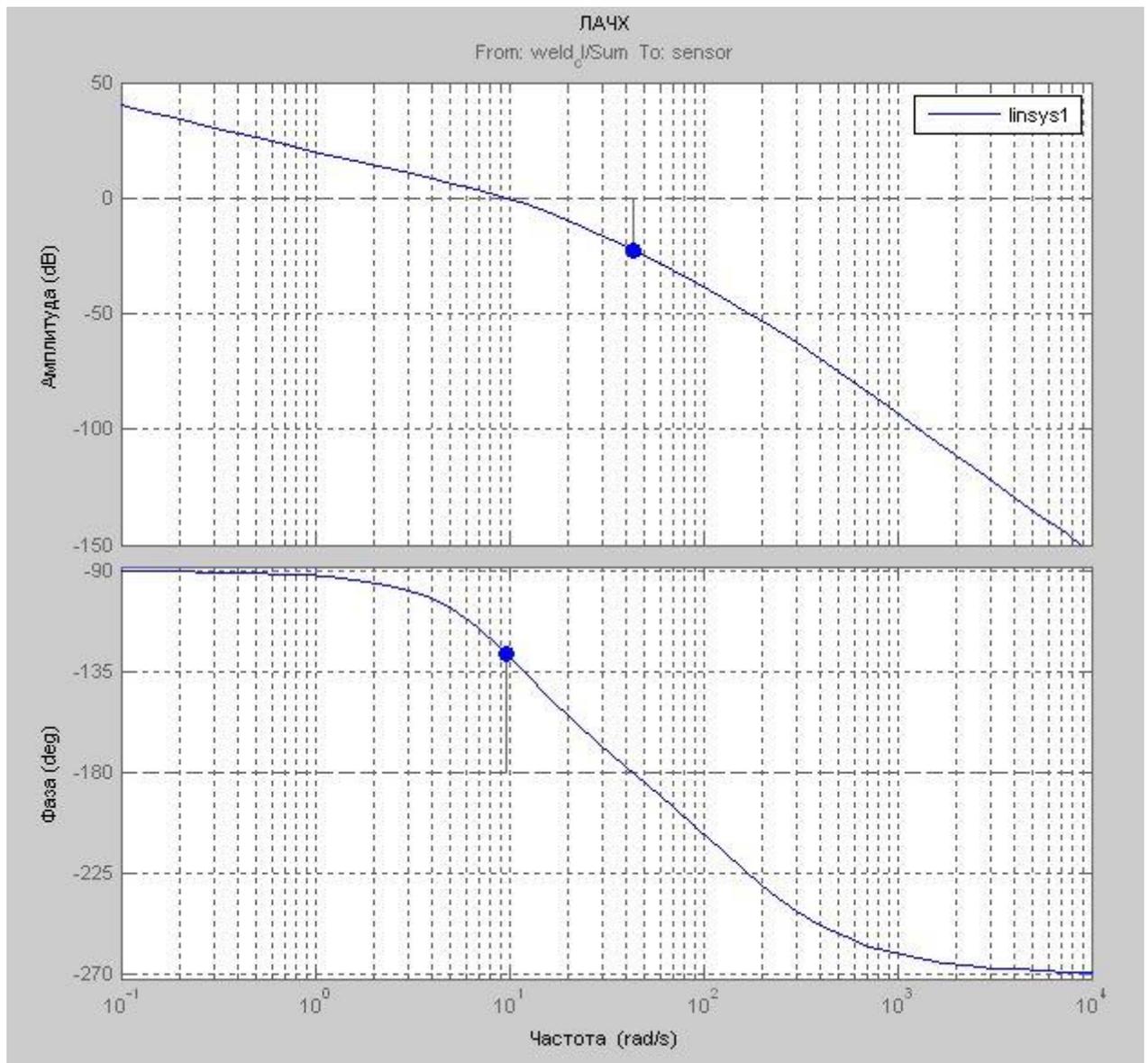


Рисунок 3.6 – амплитудно-частотная характеристика системы управления фокусировкой.

Испытания экспериментального образца проводились на установке электронно-лучевой сварки ЭЛА-6ВЧ. Сварка осуществлялась при ускоряющем напряжении 60 кВ и токе луча 40 мА. Проходы выполнялись по цилиндрическим образцам диаметром 160 мм и толщиной 10 мм, которые были изготовлены из стали

12X18H10T. Коллектор электронов располагался на расстоянии 40 мм от зоны сварки и представлял кольцо площадью 20 см<sup>2</sup>.

В ходе испытаний оценивалось время регулирования при скачке тока фокусировки на 10 мА (с 810 до 820 мА), которое для данной системы управления составило 0.52 с. Статическая составляющая ошибки не превысила 0.5 мА. Динамическая составляющая в связи с колебательным характером вторичного сигнала имеет бóльшую величину и достигает 2 мА. В то же время, такие флуктуации тока фокусировки при наличии его модуляции с амплитудой ~ 10 мА на формирование сварного шва влияния практически не оказывают.

На основании проведенного анализа делается заключение, что найденная математическая модель адекватно описывает параметры физического процесса. Таким образом, для решения задачи поиска оптимальной точки фокусировки непосредственно во время процесса сварки предлагается использовать данную модель в составе системы ПИД-регулирования. Моделирование работы регулятора с помощью модуля Simulink пакета Matlab позволило оценить быстродействие системы: длительность переходного процесса при реакции на единичный ступенчатый сигнал составила 0,4 с. Натурные испытания подтвердили быстродействие системы, а тонкая подстройка ПИД-регулятора позволила сократить длительность переходного процесса в 2 раза.

### **3.3 Выводы по главе 3**

1. Обработка результатов эксперимента, в ходе которого осуществлялся поиск зависимости изменения вторичного тока от положения фокуса луча, позволила обнаружить закономерность, взятую за основу при создании модели датчика вторичного тока для определения фокуса луча. Основываясь на существующих исследованиях, согласно которым известна статическая характеристика зависимости тока фокусировки от величины вторичного

электронного тока в плазме, предложено в качестве базовой составляющей модели использовать гаусово распределение.

2. Разложение предполагаемой модели в ряд Фурье позволило выявить в ряде гармоник закономерности, позволяющие использовать модель для детектирования положения фокуса. Гармоника  $b_1$  при токе фокусировки, близком к точке острого фокуса, представляет собой линейную зависимость, но если  $|\Delta I_\phi| > 20$  мА, то закону свойственна неопределенность – каждому значению модельной функции соответствуют 2 значения  $|\Delta I_\phi|$ , следовательно при использовании в системах регулирования требуются учитывать эти ограничения.

3. Модель датчика вторичного тока электронов включена в состав системы управления фокусировкой, для полученного контура управления составлена переходная функция, произведен анализ быстродействия, устойчивости. По результатам анализа можно заключить, что система является устойчивой, и ее быстродействие соответствует параметрам автоматизируемого технологического процесса.

## ГЛАВА 4

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОКУСИРОВКОЙ ЛУЧА

Поддержание стабильного фокуса луча требует поэтапного решения таких задач, как поиск измеряемых параметров, зависящих от текущего положения фокуса, алгоритм обработки сигнала, позволяющий оценить величину фокусировки посредством анализа измеряемого параметра, построение системы управления, позволяющей на основе полученной информации формировать управляющее воздействие для изменения положения фокуса. Решению первых двух задач были посвящены 2ая и 3я главы диссертационной работы, данная глава посвящена решению задачи объединения моделей и алгоритмов в систему автоматического управления технологическим процессом.

#### 4.1 Метод автоматического регулирования положения фокуса луча

Для обработки сигнала вторичного тока используется датчик, состоящий из коллектора электронов, представляющего собой кольцо, установленное перпендикулярно оси электронного луча на расстоянии 20..50 мм до зоны сварки, и вычислительного устройства, производящего обработку сигнала коллектора согласно математической модели, описанной в главе 3. Функциональная схема системы управления фокусировкой луча, в составе которой используется датчик представлена на рисунке 4.1.

Метод позволяет осуществлять регулирование тока фокусировки поддержанием значения результата синхронного детектирования  $b_1$  на постоянном уровне, соответствующем определенной величине удельной мощности электронного луча. При этом возможно как поддержание нулевого значения отклонения тока фокусировки от острой, так и ненулевого отклонения в некотором диапазоне. Диапазон устойчивой работы системы в общем случае ограничен начальной величиной отклонения тока фокусировки от острого значения.

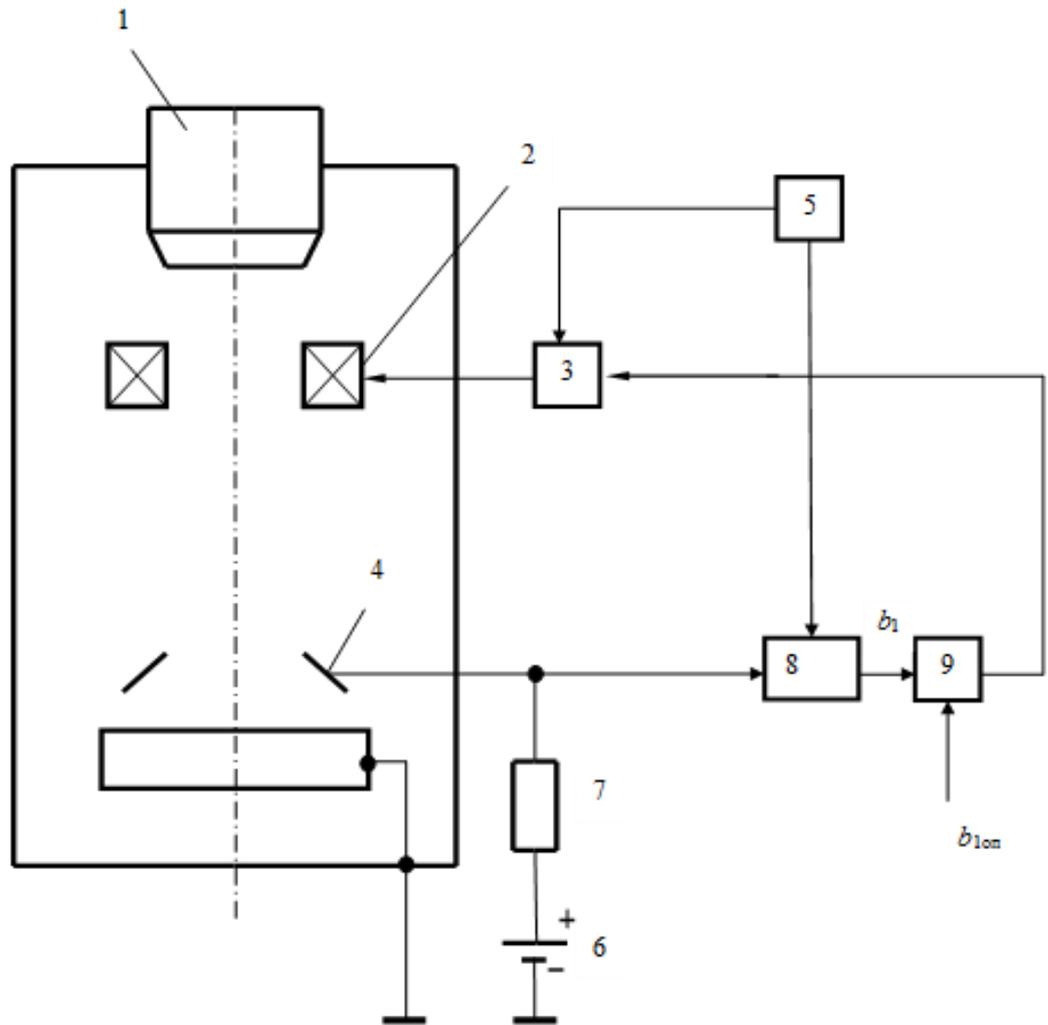


Рисунок 4.1 – Схема устройства для осуществления метода адаптивной фокусировки: 1 – электронная пушка; 2 – фокусирующая катушка; 3 – усилитель тока фокусирующей катушки; 4 – коллектор электронов; 5 – блок модуляции; 6 – источник напряжения смещения; 7 – резистор нагрузки; 8 – фильтр высоких частот; 9 – блок синхронного детектирования гармоники  $b_1$ ; 10 – блок регулирования.

Для контроля отклонения фокуса луча от оптимального положения фокуса луча, вызываемого износом катодного элемента электронной пушки, используется датчик вторичных электронов, представляющий собой коллектор электронов, располагающийся непосредственно над точкой контакта луча со свариваемым изделием (4), к которому прикладывается положительное напряжение смещения. Сигнал с датчика обрабатывается блоком синхронного детектирования (8), тактируемым сигналом модулятора (5), с помощью которого осуществляется сканирование фокуса электронного луча. Полученное значение первой гармоники  $b_1$  анализиру-

ется блоком регулирования (9), вырабатывающим в соответствии с заданным законом регулирования сигнал управления опорным током фокусировки (средним значением, относительно которого осуществляется сканирование фокуса), который через усилитель (3) подается на фокусирующую катушку (2).

## 4.2 Алгоритм работы системы

Запуск процесса сварки должен осуществляться при плавном увеличении тока луча и постепенном выходе на заданное значение фокусировки, что позволяет избежать дефектов, обусловленных быстрым изменением агрегатного состояния материала, которые могут возникать, если начинать сварку сразу на рабочем режиме [109-111].

В системе предусмотрены следующие настройки:

1. Ток луча рабочий ( $I_{л\text{ раб}}$ );
2. Скорость нарастания тока луча – величина приращения, на которое ток будет увеличиваться за определенный промежуток времени в процессе выхода на рабочий режим ( $\Delta I_{л}$ );
3. Ток фокусировки для режима максимально острого фокуса ( $I_{ф\text{ ext}}$ );
4. Задание по отклонению тока фокусировки от режима максимально острого фокуса ( $\Delta I_{ф\text{ раб}}$ );
5. Скорость изменения тока фокусировки – величина приращения, на которое ток будет увеличиваться за определенный промежуток времени в процессе выхода на рабочий режим ( $\Delta I_{ф\text{ пр}}$ );
6. Длина сварного шва ( $l$ );
7. Длина конечного участка ( $l_{\text{кон}}$ ).
8. Начальное и конечное значения диапазона изменения тока фокусировки при поиске режима острого фокуса ( $I_{ф\text{ нач}}, I_{ф\text{ кон}}$ )

Таким образом, в алгоритме работы системы можно выделить следующие этапы:

1. Задание начального положения точки фокуса ( $\Delta I_{\text{ф ст}}$ ) – в процессе выхода на рабочий режим  $\Delta I_{\text{ф}}$  изменяется от данного значения до рабочего ( $\Delta I_{\text{ф раб}}$ ). В зависимости от знака  $\Delta I_{\text{ф}} = I_{\text{ф}} - I_{\text{ф ext}}$  начальный режим может быть с перефокусированным или недофокусированным – выбор производится на основании экспериментальных результатов для конкретного материала;
2. При получении команды «Начать сварку» запускается процедура поиска режима максимально острой фокусировки, при этом величина тока луча устанавливается равной  $0,1 \cdot I_{\text{л раб}}$ , а ток фокусировки начинает меняться в пределах от  $I_{\text{ф нач}}$  до  $I_{\text{ф кон}}$ , в процессе контролируется значение функции  $S(I_{\text{ф}})$ , с помощью которой осуществляется анализ вторичного электронного тока. Максимальному значению функции будет соответствовать значение тока фокусировки для режима острого фокуса  $I_{\text{ф ext1}}$ ;
3. По достижению значения  $I_{\text{ф кон}}$  выполняется обратный проход до значения  $I_{\text{ф нач}}$  также с регистрацией максимального значения функции анализа вторичного излучения, которому будет соответствовать значение тока фокусировки  $I_{\text{ф ext2}}$ . За значение  $I_{\text{ф ext}}$ , соответствующее режиму максимально острой фокусировки, принимается среднее от  $I_{\text{ф ext1}}$  и  $I_{\text{ф ext2}}$ ;
4. По завершении процедуры поиска режима острой фокусировки начинается увеличение тока луча до рабочего значения, а также изменение тока фокусировки до значения  $\Delta I_{\text{ф раб}}$ ;
5. В рабочем режиме осуществляется регулирование тока фокусировки для поддержания заданного режима. Осуществляется контроль длительности процесса сварки. При достижении точки
6. Режим окончания сварки активируется при достижении координатой положения луча  $x$  значения  $l - l_{\text{кон}}$ . В данном режиме происходит плавное уменьшение тока луча со скоростью, рассчитываемой в соответствии со значением  $l_{\text{кон}}$ . При этом ток фокусировки может оставаться неизменным или изменяться для перехода к перефокусированному или недофокусированному режиму в зависимости от настроек для свариваемого изделия.



Рисунок 4.2 – блок-схема алгоритма работы системы управле-

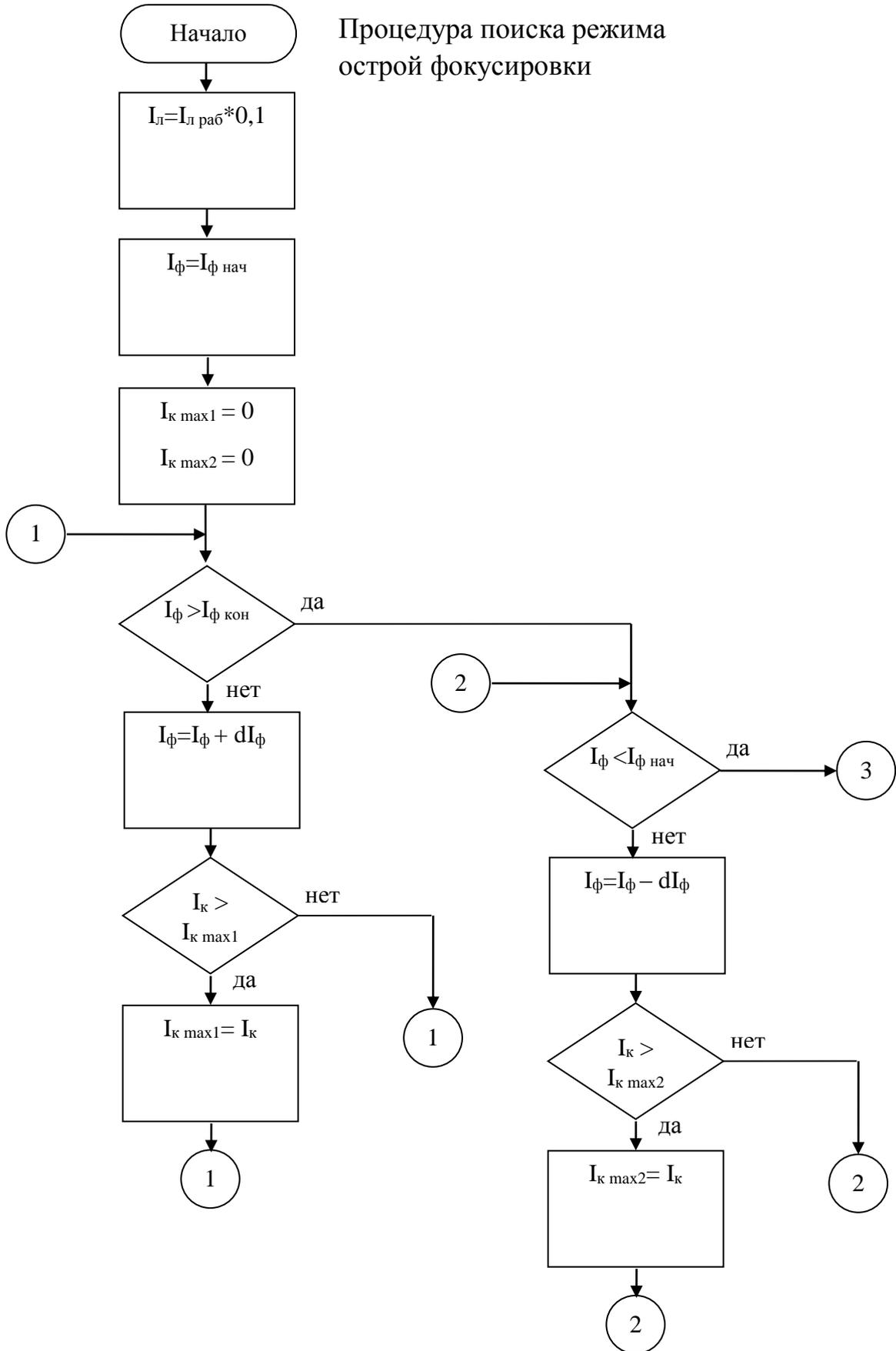


Рисунок 4.3 – блок-схема процедуры поиска режима острого фо-

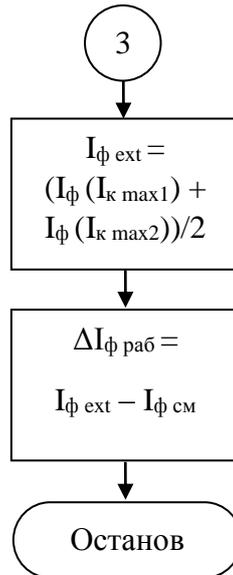


Рисунок 4.4 – блок-схема процедуры поиска режима острого фокуса (продол-

### Процедура анализа тока коллектора методом синхронного детектирования



Рисунок 4.5 – блок-схема процедуры анализа тока коллек-

## Процедура «Выход на режим»

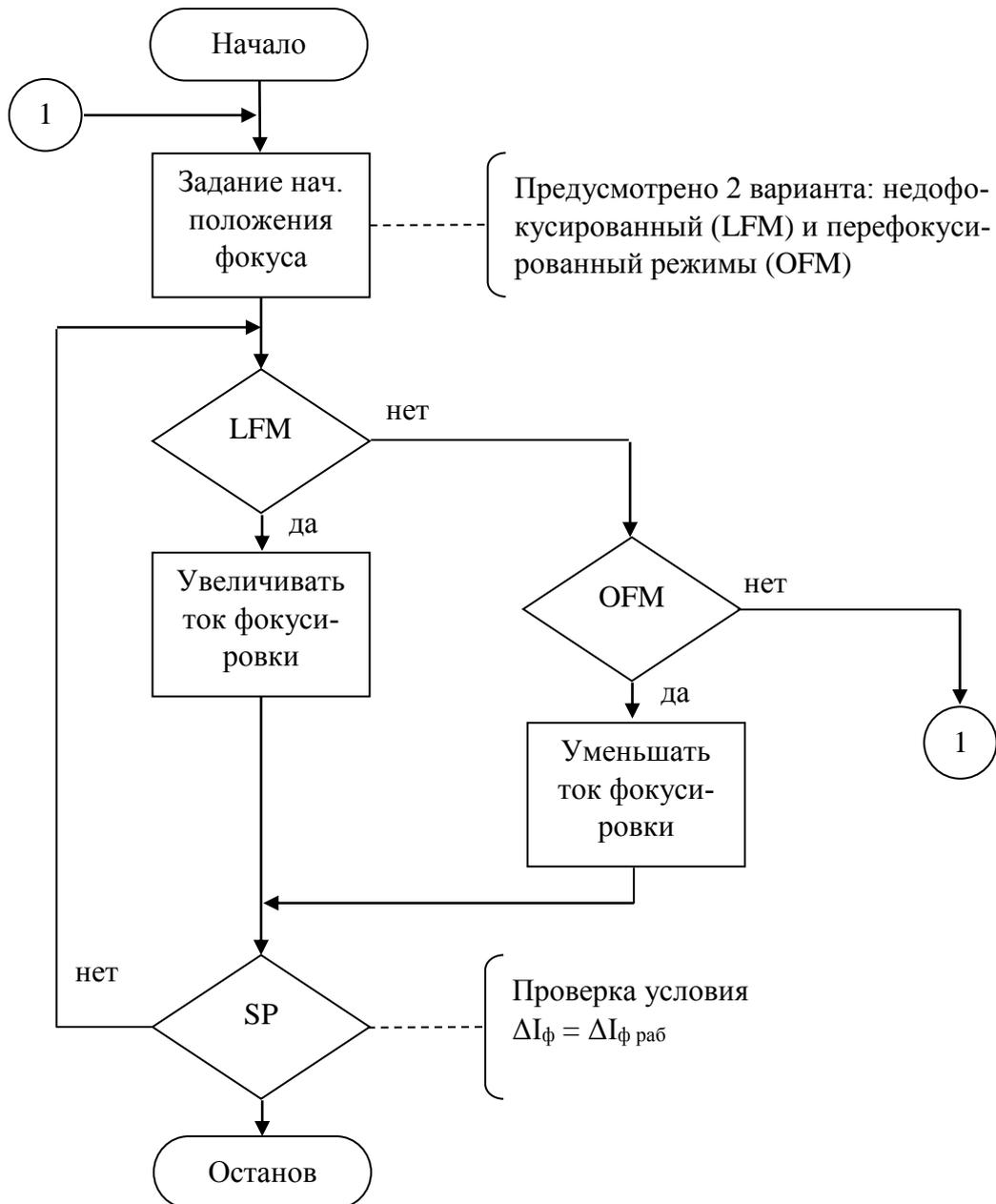


Рисунок 4.6 – блок-схема процедуры выхода на режим

## 4.3 Техническая реализация

Исследования и анализ работы системы осуществлялись на тестовом стенде, включающем в себя сварочную установку, промышленный микроконтроллер Siemens серии S7-1200, ряд схмотехнических решений [112], предназначенных для

согласования электронных устройств (рисунок 4.7). Структурная схема компонентов экспериментального стенда представлена на рисунке 4.8. Генератор вместе с усилителем создают сигнал модуляции тока фокусировки, который в модуле сопряжения накладывается на постоянный уровень тока фокусировки. В модуле сопряжения совместно с датчиками, установленными в технологической камере установки ЭЛС, осуществляется измерение и синхронное детектирование вторичного сигнала электронного тока в плазме. Величина первой гармоники тока  $I_{b1}$  в аналоговой форме поступает на блок управления, выполненный на базе контроллера Siemens S7-1200 6ES7211-1AE31-0XB0 с платой аналогового вывода 6ES7232-4HA30-0XB0. Блок управления осуществляет автоматическое поддержание значения фокусировки, используя ПИД-регулирование. Взаимодействие с оператором осуществляется с помощью персонального компьютера, соединённого с блоком управления через сеть Ethernet.



Рисунок 4.7 – Исследовательский стенд.

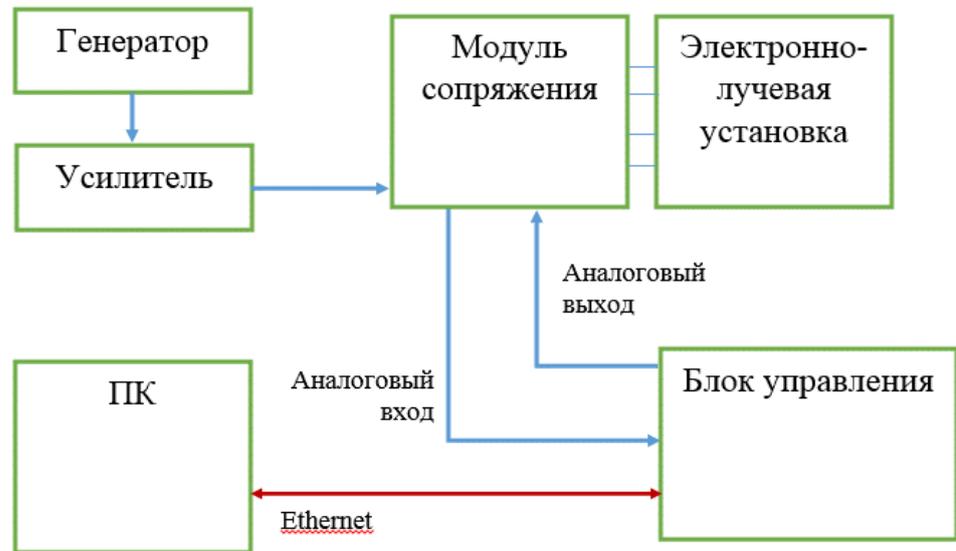


Рисунок 4.8 – Структурная схема экспериментального образца системы управления фокусировкой.

Разрабатываемые алгоритмы реализовывались средствами промышленной автоматизации фирмы Siemens на оборудовании серии S7-1200. В контуре был задействован блок ПИД-регулятора, содержащийся в библиотеке среды разработки программного обеспечения контроллера. Посредством интерфейса оператора осуществлялась настройка параметров регулятора и граничных условий алгоритма, а также наблюдение за динамикой процесса регулирования и оценка его длительности (Рисунок 4.9).

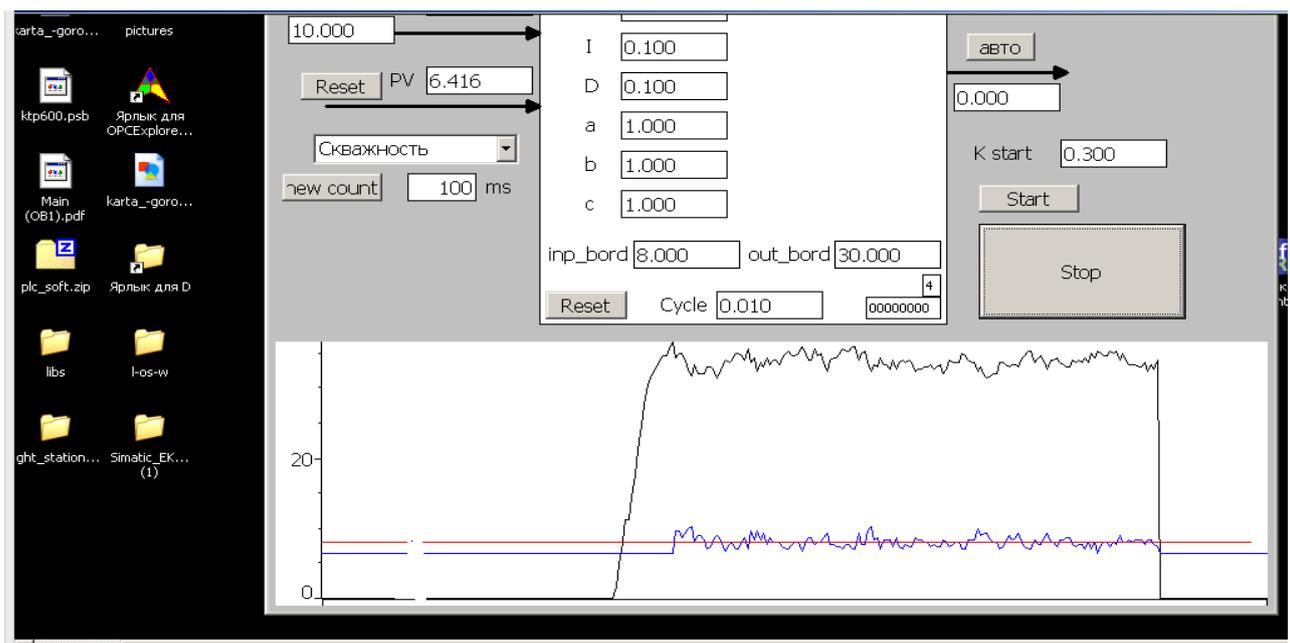


Рисунок 4.9 – Интерфейс настройки регулятора системы управления фокусировкой.

Также в ходе исследований был разработан программный продукт, назначением которого являлась реализация процесса управления фокусировкой как в демонстрационном режиме, когда на вход программы подавалась выборка измеренных значений вторичного электронного тока, так и в режиме сопряжения с системой управления сварочной установкой, когда процесс уже осуществлялся в режиме реального времени. При разработке использовалась библиотека Qt 4.8, взаимодействие с системой управления установкой ЭЛС осуществлялось посредством АЦП и ЦАП L-Card e14-440 и e14-140m.

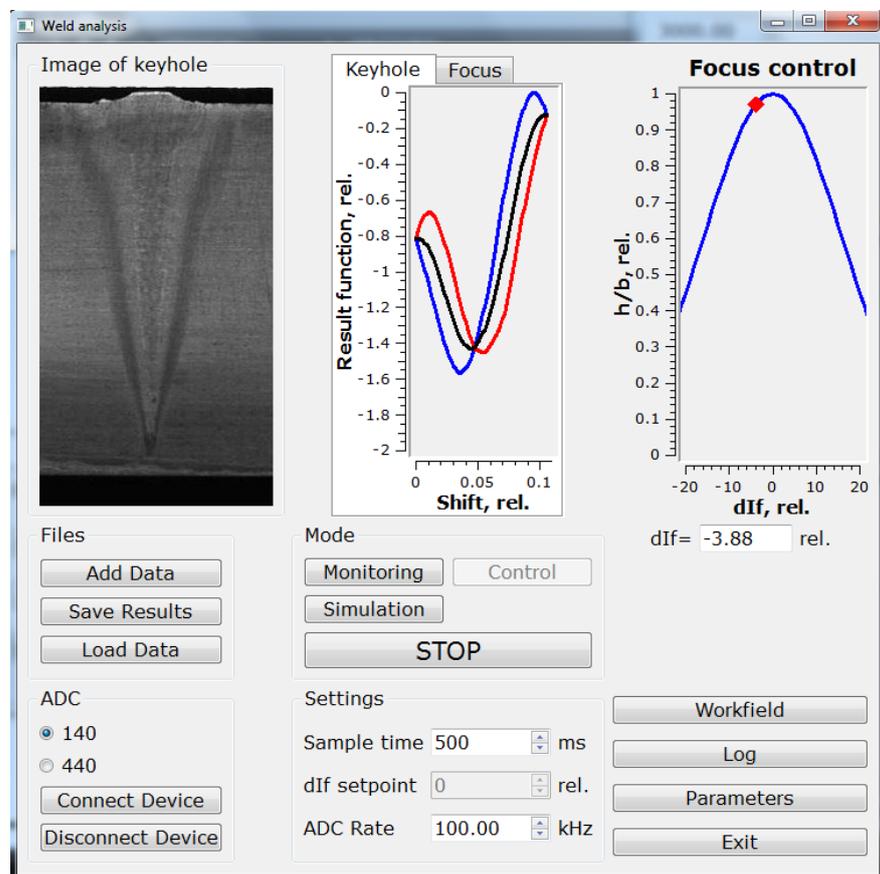
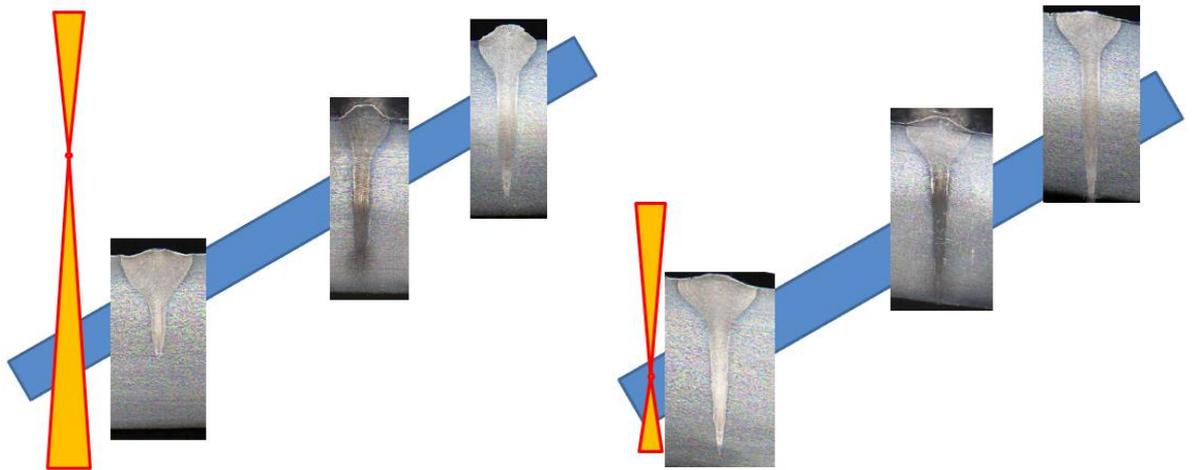


Рисунок 4.10 – Рабочее окно программного регулятора.

Действие внешних помех, приводящих к дрейфу фокусировки, моделировалось изменением в процессе сварки рабочей дистанции (расстояния между свариваемым образцом и электронно-лучевой пушкой). На рисунке 4.11 приведена схематичная иллюстрация данного процесса.

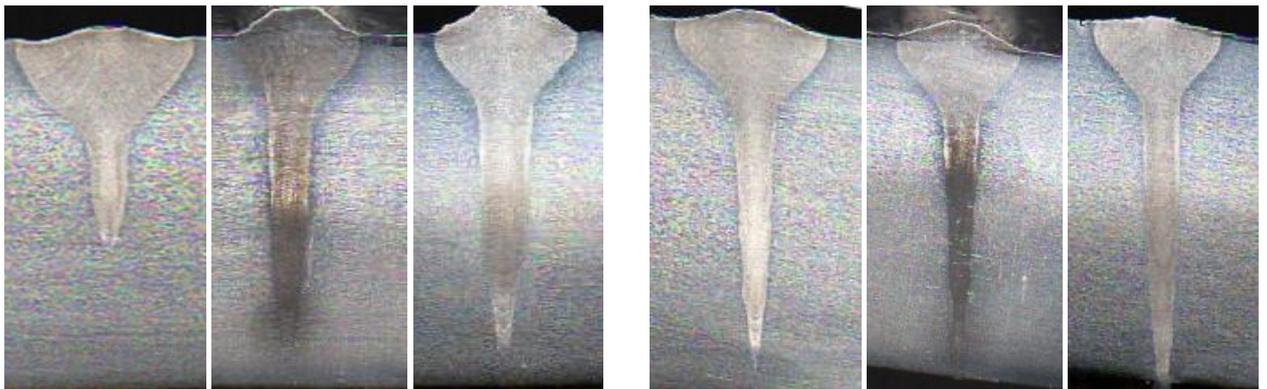


а) без управления фокусировкой

б) управление фокусировкой активно

Рисунок 4.11 – моделирование изменения фокусного расстояния посредством использования наклонного опытного образца

В результате при использовании системы управления фокусировкой значительно повышается равномерность получаемых сварных швов – изображения поперечных разрезов, приведенные на рисунке 4.12 наглядно демонстрируют качественные изменения сварного шва при использовании управления фокусировкой луча.



а) без управления фокусировкой

б) управление фокусировкой активно

Рисунок 4.12 – поперечные сечения швов при разных положениях точки фокуса

Натурные испытания экспериментального образца показали улучшение равномерности сварных швов на 50% за счет повышения точности задания положе-

ния фокуса. В то же время за счет снижения на 60% времени, требуемого на предварительную настройку, возросла производительность варочной установки.

Созданная система позволяет получать сварные швы с заданными параметрами на протяжении всего цикла службы катодного элемента электронной пушки за счет обеспечения стабильности фокусировки, а также позволяет исключить процесс поиска оптимального положения фокуса из зоны ответственности оператора установки, как следствие, повышается производительность установки и качество получаемых сварных соединений, существенно снижается процент брака.

#### **4.4 Выводы по главе 4.**

1. Для технической реализации моделей составлена структурная схема системы. На основе полученной структуры разработаны и проверены в лабораторных условиях алгоритмы работы системы. Таким образом, совокупность структурной схемы и алгоритмов работы можно считать описанием способа управления фокусировкой.

2. В ходе технической реализации полученного способа управления разработан ряд схемных решений и программных компонентов, которые применяются в составе промышленной сварочной установки.

3. Внедрение разработанной системы управления позволило улучшить равномерность сварных швов на 50% вследствие за счет повышения точности задания положения фокуса электронного луча, при этом производительность установки возросла на 60% за счет исключения из технологического процесса процедуры предварительной настройки фокусировки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения работы, в ходе которой решались задачи, обусловленные поставленными целями, можно сформулировать следующие выводы:

1. Проведен анализ существующих способов и систем контроля фокусировки электронного луча при ЭЛС. Показана целесообразность использования в качестве информационного параметра параметров сигнала вторичного электронного тока в плазме. Исследовано влияние сканирования фокуса на параметры вторичного сигнала и на формирование сварного шва.

2. Осуществлено исследование закономерностей формирования информационного сигнала вторичного электронного тока в плазме, при сканировании фокуса, применяемом для управления процессом ЭЛС. Предложен новый подход к анализу сигнала вторичного электронного тока в плазме при сканировании фокуса – обработка методом синхронного накопления. Установлено наличие взаимосвязи параметров вторичного тока в высокочастотном спектре и фокусировки электронного луча.

3. Разработана математическая модель датчика вторичного тока. Установлено, что для управления фокусировкой при ЭЛС со сканированием фокуса необходимо использовать первую гармонику вторичного тока, так как она имеет наибольшую амплитуду, а также выраженную зависимость знака от режима фокусировки. Получено аппроксимирующее выражение для первой гармоники вторичного тока, произведена оценка достоверности математического описания датчика по результатам сравнения с результатами экспериментов.

4. Разработан способ управления фокусировкой на основе анализа высокочастотной составляющей вторичного электронного тока, осуществлена техническая реализация системы управления, в которой данный способ задействован. Внедрение разработанной системы на промышленном предприятии позволило улучшить равномерность сварных швов на 50%, обеспечить воспроизводимость фокусировки и сократить время предварительной настройки фокуса на 60%.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Mushtaq, S. Enhancement of analyte atomic lines with excitation energies of about 5 eV in the presence of molecular gases in analytical glow discharges [Текст] / Mushtaq S., Steers E.B., Pickering J.C., Smid P. // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. – 2014. – № 29. – С. 2022–2026.
2. Bird, R.B. *Transport Phenomena* [Текст] / Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. // John Wiley and Sons. – 2002. – 983 с.
3. Язовских, В.М. Электронно-лучевая сварка с адаптацией фокусировки электронного пучка [Текст] / Язовских В.М., Беленький В.Я., Кротов Л.Н., Трушников Д.Н. // Сборник докладов «Перспективные пути развития сварки и контроля – «Сварка и контроль – 2001». – Воронеж. – 2001. – С. 23-29.
4. Патон, Б.Е. Динамические модели каналов проплавления при электронно-лучевой сварке [Текст] / Патон Б.Е., Лесков Г. И., Нестеренков В. М. // *Автоматическая сварка*. – 1988. – № 1. – С. 1-6.
5. Dilthey U. Estimated determination of kinetics of diffusion phase transformations in low-alloy steels in beam welding [Текст] / Dilthey U., Gumenyuk A. V., Turichin G. A. // *АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА*. – 2006. – С. 12.
6. Беленький, В. Я. О природе вторичного тока в плазме, образующейся в зоне взаимодействия электронного луча при сварке [Текст] / Беленький В. Я., Язовских В. М., Журавлев А. П. // *Физика и химия обработки материалов*. – 1983. – № 6. – С. 128-129.
7. Mladenov, G. M. Physical and thermal processes during electron beam welding [Текст] / Mladenov G. M., Petrov P. I. // *Materials and manufacturing processes*. – 1999. – Т. 14. – № 3. – С. 331-345.
8. Башенко, В.В. Контроль и стабилизация глубины проплавления при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению сварочной ванны [Текст] / Башенко В. В., Лаптенко В. Д., Баякин С. Г., Угрюмов В. Г. // *Сварочное производство*. – 1989. – № 5. – С. 35-36.

9. Vinogradov, V.A. Using plasma radiation above the pool for controlling and regulating fusion welding processes [Текст] // *Welding International*. – 1994. – Т. 8. – № 6. – С. 488-490.
10. Браверман, В.Я. Анализ зависимости рентгеновского излучения от положения канала проплавления относительно стыка при электронно-лучевой сварке [Текст] / Браверман В.Я., Белозерцев В.С. // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. – 2010. – №1. – С. 131-133.
11. Зорин, Ю.Н. Особенности сварочной ванны как элемента системы автоматического регулирования при электронно-лучевой сварке [Текст] / Зорин Ю. Н., Сотникова Г. П. // *Труды Моск. высш. техн. училища им. Н. Э. Баумана*. – 1974. – 2. – 191. – С. 61-62.
12. Акопьянц, К.С. Системы контроля и управления формированием проплавления при электронно-лучевой сварке [Текст] / Акопьянц К. С., Емченко-Рыбко А. В., Непорожний В. Ю., Шилов Г. А. // *Автоматическое управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки: Сб. науч. тр.* – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. – 1987. – С. 22-29.
13. Браверман, В.Я. Устройство управления фокусировкой и глубиной проплавления по собственному рентгеновскому излучению при ЭЛС с модуляцией уровня фокусировки [Текст] / Браверман В. Я., Скурихин Д. А., Баякин С. Г., Шабанов В. Ф., Башенко В. В. // *Сварочное производство*. – 1997. – № 1. – С. 16-19.
14. Olszewska, K. Control of the electron beam active zone position in electron beam welding processes [Текст] / Olszewska K., Friedel K. // *Vacuum*. – 2004. – Т. 74. – №. 1. – С. 29-43.
15. Hiramoto, S. Development of an automatic beam focus system for electron beam welding [Текст] / Hiramoto S., Ohmine M., Sakamoto M. // *Welding International*. – 1991. – №10. – С. 763–768.

16. Sibillano, T. Closed loop control of penetration depth during CO<sub>2</sub> laser lap welding processes [Текст] / Sibillano, T.; Rizzi, D.; Mezzapesa, F.P.; Lugarà, P.M.; Konuk, A.L.; Aarts, R.; Veld, B.H.; Ancona, A. // *Sensors* . – Т. 012. – № 12. – pp. 11077–11090.
17. Ластовиря, В.Н. Система оперативного контроля проплавливающих свойств электронного пучка при сварке [Текст] / В.Н. Ластовиря, П.В. Полянский. // *Сварочное производство*. – 1990. – № 8. – с. 25-26.
18. Румянцев, Е.Н. Использование термоэмиссии с поверхности парогазового кратера для контроля положения стыка при ЭЛС [Текст] / Румянцев Е.Н., Ластовиря В.Н. // *Сварка и диагностика*. – 2011. – № 1. – С. 21-25.
19. Мурыгин, А.В. Контроль ширины стыка деталей и ширины канала проплавления по рентгеновскому излучению с поверхности свариваемых деталей [Текст] / Мурыгин А.В., Лаптенко В.Д., Бочаров А.Н. // «Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки 2011» – Материалы Второй Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции, 19–22 мая 2011 года, Санкт-Петербург, 2011, с. 262-270.
20. Браверман, В.Я. Анализ зависимости рентгеновского излучения от положения канала проплавления относительно стыка при электронно-лучевой сварке [Текст] / Браверман В.Я., Белозерцев В.С. // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. – 2010. – №1. – С. 131-133.
21. Hagelaar, G. J. M. Modeling of microdischarges for display technology [Текст] // *Technische Universiteit Eindhoven*. – 2000. – 109 с.
22. Саломатова, Е.С. Моделирование температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке [Текст] / Саломатова Е.С., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. // *Тепловые процессы в технике*. – 2013. – № 11. – С. 514-518.
23. Трушников, Д.Н. Управление формированием сварного шва при ЭЛС по вторичной электронной эмиссии из зоны сварки [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Трушников Дмитрий Николаевич. – Пермь. – 2002. – 16 с.

24. Трушников, Д.Н. Вторично-эмиссионный сигнал из зоны электронно-лучевой сварки и его связь с геометрическими параметрами сварного шва [Текст] / Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Интеллектуальные системы в производстве. Ижевск. – 2011. – т.18. – № 2. – С. 13-17.

25. Трушников, Д.Н. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением [Текст] / Трушников Д.Н., Язовских В.М., Беленький В.Я, Кротов Л.Н. // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22-24.

26. Mara, G. L., Method for producing spikefree electron beam partial penetration welds [Текст] / Mara G. L., McMaster R.C. // Welding Research Supplement. – 1974. – 53 – № 6. – Pp. 246-251.

27. Браверман, В.Я. Зависимость рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при различной степени фокусировки в процессе электронно-лучевой сварки [Текст] / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев // Вестн. Сиб. Гос. Аэрокосмич. Ун-та им. Акад. М.Ф. Решетнева. – 2010. – С. 121-125.

28. Браверман, В.Я. Частотный метод определения уровня фокусировки электронного луча и глубины проплавления при электронно-лучевой сварке [Текст] / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев // Вестн. Сиб. Гос. Аэрокосмич. Ун-та им. Акад. М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 4. – С. 65-67.

29. Ластовирия, В.Н. К вопросу управления формой проплава в процессе ЭЛС как системе «источник энергии – парогазовый кратер» [Текст] // Материалы третьей международной электронной научно-технической конференции «Компьютерные технологии в соединении материалов – 2015» (<http://comhightech.tsu.tula.ru/weldsim/>)

30. Зуев, И.В. Оценка глубины проплавления при электронно-лучевой сварке [Текст] / Зуев И.В., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 1. – С. 9–14.

31. Зуев, И.В. Основы электронно-лучевой обработки материалов [Текст] / И. В. Зуев, Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

32. Башенко, В.В. Импульсный характер потоков заряженных частиц из канала при электронно-лучевой сварке [Текст] / Башенко В. В. Мауер К. О. // Автоматическая сварка. – 1976. – №8. – С. 21–23.
33. Башенко, В.В. Исследование процесса образования сварного шва при электронно-лучевой сварке [Текст] / Башенко В. В., Миткевич Е. А. // Электронно-лучевая сварка. – Воронеж, МЭИ, ВПИ. – 1970. – С. 37–44.
34. Кайдалов, А.А. Основные технологические приемы сварки электронным пучком [Текст] / Кайдалов А. А., Назаренко О. К. // Автоматическая сварка. – 1986. – № 4. – С. 51-58.
35. Ластовиря, В. Н. Экспериментальная методика идентификации уравнения связи для оценки формы проплава в ходе электронно-лучевой сварки [Текст] / Ластовиря В. Н. // Литейное и сварочное производства. – №3. – 2010. – С. 19-24.
36. Ластовиря, В.Н. К вопросу ведения пучка вдоль свариваемого стыка по току термоэлектронов кромок [Текст] / Ластовиря В.Н., Румянцев Е.Н. // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 2-3 (4). – С. 27-31.
37. Ластовиря, В.Н. Экспериментальная методика идентификации уравнения связи для оценки формы проплава в ходе электронно-лучевой сварки [Текст] / Ластовиря В.Н. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 3. – С. 19-24
38. Башенко, В.В. Динамика поведения расплава в сварочной ванне при нагреве металла высококонцентрированным источником энергии [Текст] / Башенко В. В., Миткевич Е. А., Лопота В. А. // Материалы VIII Всесоюз. понф. по электронно-лучевой сварке. – М. – 1983. – С. 86-94.
39. Патон, Б.Е. Динамические модели каналов проплавления при электронно-лучевой сварке [Текст] / Патон Б.Е., Лесков Г. И., Нестеренков В. М. // Автоматическая сварка. – 1988. – № 1. – С. 1-6.
40. Ланкин, Ю.Н. Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования

процесса электронно-лучевой сварки [Текст] / Ланкин Ю. Н. - Киев : ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1982. – 32 с.

41. Беленький, В.Я. Исследование колебательных процессов в канале проплавления при электронно-лучевой сварке [Текст] / Беленький В. Я., Язовских В. М., Журавлев А. П. // Сварочное производство. – 1979. – № 8. – С. 6-7.

42. Беленький, В.Я. О прохождении вторичного тока при электронно-лучевой сварке [Текст] / Беленький В. Я., Язовских В. М. // Электронная обработка материалов. – 1996. – № 1. – С. 34-36.

43. Шилов, Г.А. Влияние частоты и диаметра круговой развертки электронного луча на проплавление металла при ЭЛС [Текст] / Шилов Г. А., Акопьянц К. С., Касаткин О. Г. // Автоматическая сварка. – 1983. – № 8. – С. 25-28.

44. Углов, А.А. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии [Текст] / Углов А.А., Селищев С.В., Анисимов С. И. – Москва: Наука. – 1987. – 132 с.

45. Назаренко, О.К. Особенности фокусировки мощных сварочных электронных пучков [Текст] / Назаренко О. К., Пацьора С. К. // Автоматическая сварка. – 1983. – № 5. – С. 58-61.

46. Назаренко, О.К. Электронно-лучевая сварка [Текст] / Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н. и др.; под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.

47. Лаптенко, В.Д. Управление электронно-лучевой сваркой [Текст] / Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н., Браверман В.Я. – Красноярск: САА. – 2000. – 234 с.

48. Серегин, Ю.Н. Экспериментальные исследования по оптимизации технологии электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов [Текст] / Ю.Н. Серегин, В.Д. Лаптенко, Н.В. Успенский, В.П. Ниткин. // Сб. докл. межд. науч.-техн. конф. «Технологии и оборудование ЭЛС-2011». – СПб. – 2011. – С. 71-80.

49. Дружинина, А.А. Метод контроля влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению из зоны обработки

[Текст] / Дружинина А.А., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 5. – С. 158-163.

50. Беленький, В.Я. О природе вторичного тока в плазме, образующейся в зоне взаимодействия электронного луча при сварке [Текст] / Беленький В. Я., Язовских В. М., Журавлев А. П. // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 6. – С. 128-129.

51. Беленький, В.Я. Электрофизические процессы в зоне нагрева металла концентрированным электронным пучком и их использование для контроля процессов электронно-лучевой обработки материалов [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Санкт-Петербург. – 1993. – 30 с.

52. Степанов, В.В. Амплитуда колебаний вторичного тока при электронно-лучевой сварке [Текст] / Степанов В. В., Беленький В. Я., Язовских В. М., Журавлев А. П. // Сварочное производство. – 1982. – № 4. – С. 8-11.

53. Браверман, В.Я. Тормозное рентгеновское излучение при электронно-лучевой сварке и его взаимосвязь с параметрами процесса [Текст] / В.Я. Браверман // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2008. – № 3. – С. 204-212.

54. Браверман, В.Я. Экспериментальные исследования рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке [Текст] / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев, А.Н. Успенский // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2005. – С. 196–200.

55. Трушников, Д.Н. О колебательных процессах в зоне взаимодействия мощного концентрированного электронного пучка при электронно-лучевой сварке [Текст] / Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Саломатова Е.С., Младенов Г.М., Колев Е.Г. // Доклады Санкт-Петербургской Международной научно-технической конференции «Технологии и оборудование ЭЛС-2014». – Санкт-Петербург. 24-26 июня 2014г. – С. 98-102.

56. Трушников, Д.Н. Изучение физических процессов при электронно-лучевой сварке по параметрам вторичного тока в плазме [Текст] / Трушников Д.Н. // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – № 5. – С. 36-45.
57. Arata, Y. Theoretical analysis of weld penetration due to high energy density beam [Текст] / Arata Y., Miyamoto I. // Transactions of the JWRI. – 1972. – Т. 1. – №. 1. – С. 11-16.
58. Mauer, K.O. Systems for beam positioning in electron beam welding [Текст] / K.O. Mauer // Schweisstechnik. – 1982. – Т.32. – С. 368–373.
59. Алькдироу, Р.Х. Прогнозирование перспектив развития параметров инновационных проектов, описываемых S-образной кривой [Текст] / Алькдироу Р.Х., Мыльников Л.А. // VII Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Управление большими системами»: Сборник трудов. – Т1. – Пермь:ПГТУ. – 2010. – С.118-123.
60. Dilthey, U. Simulation Tool For Electron Beam Welding [Текст] / U. Dilthey, S. Boehm, T. Welters, S. Illin, G. Turichin // 6th International Conference on Welding and Melting by Electron and Laser Beams. – France. – Tulon. – 1998. – Pp. 39-45.
61. Браверман, В.Я. Вопросы управления формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке [Текст] / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев, В.П. Литвинов, О.В. Розанов // Вестн. Сиб. Гос. Аэрокосмич. Ун-та им. Акад. М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 2. – С. 23-29.
62. Башенко, В.В. О радиоизлучении плазмы, возникающей в камере при электронно-лучевой сварке [Текст] / В.В. Башенко // Сварочное производство. – 1978. – № 7. – С. 12–115.
63. Бурыкин, Ю.И. Экспериментальное исследование высокочастотных колебаний, возникающих при электронно-лучевой сварке [Текст] / Ю.И. Бурыкин, С.М. Левитский, О.К. Назаренко // Физика и химия обработки материалов. – 1980. – № 2. – С. 142 – 146.

64. Трушников, Д.Н. Использование параметров вторично-эмиссионного сигнала для управления проплавлением при электронно-лучевой сварке [Текст] / Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Щавлев В.Е., Пискунов А.Л., Лялин А.Н. // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1. – С. 175-181.
65. Muller, M. Electron beam welding – a fully automatic welding process [Текст] / M. Muller // Dev. Innov. Improved weld. prod. - I-st. int. conf. Birmingham. – 13-15 sept. – 1983. – Adington. – 1984. – PP. 32/1–32/8.
66. Ланкин, Ю.Н. Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования процесса электронно-лучевой сварки [Текст] / Ю.Н. Ланкин. – Киев. – Наукова думка. – 1982. – 32 с.
67. Нестеренков, В.М. Влияние геометрии шва на параметры ионного тока при электронно-лучевой сварке [Текст] / В.М. Нестеренков // Автомат. сварка. – 1982. – № 3. – С. 34–36.
68. Акопьянц, К.С. Влияние ускоряющего напряжения на параметры проплавления при электронно-лучевой сварке [Текст] / К.С. Акопьянц, Ю.В. Зубченко, В.Е. Локшин, О.К. Назаренко // Автомат. Сварка. – 1972. – № 11. – С. 11–15.
69. Акопьянц, К.С. Контроль глубины проплавления и фокусировки электронного луча по частоте пульсаций ионного тока при сварке [Текст] / К.С. Акопьянц, А.В. Емченко-Рыбко // Автомат. Сварка. – 1981. – № 9. – С. 28–32.
70. DebRoy, T. Physical processes in fusion welding [Текст] / DebRoy T., David S.A. // Reviews of Modern Physics. – 1995. – Vol. 67, №. 1. – P. 85–112.
71. Скрипов, В.П. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии [Текст] : справочник. – М.: Атомиздат. – 1980. – 208 с.
72. Беленький, В. Я. Контроль электронно-лучевой сварки с использованием плазменных явлений в области сварочной ванны [Текст] / Беленький В. Я., Язовских В. М. // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 7-9.

73. Сукач, К.А. Повышение стабильности качества швов при электронно-лучевой сварке [Текст] / Сукач К. А., Ковбасенко С. Н., Куцан Ю. Г. // Автоматическая сварка. – 1986. – № 7. – С. 72-73.
74. Зорин, Ю.Н. Выбор оптимального диапазона частоты модуляции тока луча при ЭЛС [Текст] / Зорин Ю.Н., Шахорин А.П. // Электронно-лучевая сварка / Матер. Всес. конф. – Москва. – 1-2 апр. 1986. – С. 28-33.
75. Зорин, Ю.Н. Особенности сварочной ванны как элемента системы автоматического регулирования при электронно-лучевой сварке [Текст] / Зорин Ю.Н., Сотникова Г. П. // Труды Моск. высш. техн. училища им. Н. Э. Баумана. – 1974. – 2. – 191. – С. 61-62.
76. Ланкин, Ю.Н. Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования процесса электронно-лучевой сварки [Текст] / Ланкин, Ю.Н. – Киев. – ИЭС им. Патона АН УССР. – 1982. – 32 с.
77. Petrov, V. Experimental investigation of weld pool formation in electron beam welding [Текст] / Petrov V., Georgiev C., Petrov G., Mladenov V. // Vol. 51, Issue 3. – 1 November 1998. – P. 339-343.
78. Griskey, M. C. Secondary-Electron-Emission Instability in a Plasma [Текст] / Griskey M. C., Stenzel R. L. // Physical review. – Vol. 82. – № 3. – Jan 1999. – P. 556-559
79. Christian, K. Frequency-based analysis of weld pool dynamics and keyhole oscillations at laser beam welding of galvanized steel sheets [Текст] / Christian K., Michael S. // Physics Procedia. – Vol. 5. – 2010. P.447–453.
80. Teresa, S. Plasma plume oscillations monitoring during Laser Welding of stainless steel by discrete wavelet transform application [Текст] / Teresa S., Antonio A., Domenico R., Valentina L., Luigi T., Pietro M. L. // Sensors. – 2010. – 10(4). P. 3549-3561.

81. Peng-fei, U. Study on Character of Electron Beam Dynamic Focus during EBW [Текст] / Peng-fei U., Ya-jun W., Zhi-yong M., Shui-li G., Chun-ming W. // Journal of Aeronautical Materials. – 2009. – P. 329–335.
82. Трушников, Д.Н. Модель формирования вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка [Текст] / Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Щавлев В.Е., Южаков А.А., Пискунов А.Л., Лялин А.Н. // Сварка и диагностика. – 2013. – № 1. – С. 39-42.
83. Беленький, В.Я. О природе вторичного тока в плазме, образующейся в зоне взаимодействия электронного луча при сварке [Текст] / Беленький В. Я., Язовских В. М., Журавлев А. П. // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 6. – С. 128-129.
84. Mladenov, G.M. Physical and thermal processes during electron beam welding [Текст] / Mladenov G. M., Petrov P. I. // Materials and manufacturing processes. – 1999. – Т. 14. – №. 3. – С. 331-345.
85. Trushnikov, D.N. Secondary-Emission signal for weld formation monitoring and control at electron beam welding (EBW) [Текст] / D. N. Trushnikov, V.Ya. Belenki'y, G.M. Mladenov, N. S. Portnov // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. (Materials science and Engineering technology). – 2012. – 43. – No. 10. – С. 892–897.
86. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2 т. Т. 1. Основные принципы и классические методы [Текст] / Макс Ж., Карре Ж.-К., Пельтье Ф. – Пер. с франц. А.Ф. Горюнова и А.В. Крянева; под ред. Н.Г. Волкова. – М.: Мир. – 1983. – 312 с.
87. Батухтин, В.А. Обработка вторичных излучений для контроля и управления процессом электронно-лучевой сварки [Текст] / Батухтин В.А., Башенко В.В. // Автоматическое управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки: Сб. науч. тр. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. – 1987. – С. 64-74.

88. Лаврентьев М. М. Некорректные задачи математической физики и анализа [Текст] / Лаврентьев М. М., Романов В. Г., Шишатский С. П. – М.: Наука. – 1980. – 288 с.
89. Маркова, Е.В. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента [Текст] / Маркова Е.В., Лисенков А.Н. – М.: Наука. – 1979. – 345 с.
90. Weberpals, R. Utilization of quantitative measurement categories for process monitoring [Текст] / Weberpals, R. Schuster, P. Berger, T. Graf // 29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. – ICALEO. – 2010 – Congress proceedings. – Sep. 26, 2010 - Sep. 30, 2010. – Laser Institute of America. – Anaheim. – USA.
91. Dilthey, U. Mathematical simulation of the influence of ion-compensation, self-magnetic field and scattering on an electron beam during welding [Текст] / Dilthey U., Goumeniouk A., Nazarenko O., Akopjantz K. // Vacuum. – 2001. – N. 62. – №2. – С. 87-96.
92. Функциональный анализ. Справочная математическая библиотека [Текст] / Под редакцией Крейна С. Г. – М.: Наука. – 1964. – 424 с.
93. Hadamard, J. Sur les problemes aux derivees partielles et leur signification physique [Текст] / Hadamard J. // Bull.Univ.Princeton. – 1902. – Vol.13. – P .49-52.
94. Верлань, А.Ф. Интегральные уравнения: Методы. Алгоритмы. Программы: Справочное пособие [Текст] / Верлань А.Ф., Сизиков В.С. – Киев: Наук. думка. – 1986. – 548 с.
95. Пискунов, А.Л. Обзор результатов использования вторично-эмиссионных сигналов для контроля и управления процессом формирования шва при электронно-лучевой сварке [Текст] / Пискунов А.Л., Лялин А.Н., Щавлев В.Е., Абдуллин А.А. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14. – № 3. – С. 82-95.

96. Нестеренков, В.М. Влияние колебаний электронного пучка на характер и интенсивность потоков плазмы в пародинамическом канале [Текст] / Нестеренков В. М. // Автоматическая сварка. – 1978. – № 8. – С. 69-71.
97. Koleva, E. Statistical modelling and computer programs for optimisation of the electron beam welding of stainless steel [Текст] / Koleva E. // Vacuum. – 2001. – Т. 62. – №. 2. – С. 151-157.
98. Schwarz, H. Remark on power density, total power and pressure of electron beams as a welding, cutting and surfacing tool [Текст] / Schwarz H. // Review Scientific Instruments. – 1962. –Т. 33. – № 6. – С. 688-670.
99. Trushnikov, D. Plasma charge current for controlling and monitoring electron beam welding with beam oscillation [Текст] / Trushnikov, D., Belenkiy, V., Shchavlev, V., Yuzhakov A., Piskunov, A., Abdullin, A., Mladenov, G. // Sensors. – Vol. 12(12). – 2012. – P. 17433-17445.
100. Schavlev, V. E. Investigation of Processes in the Keyhole at Electron-beam Welding by Measuring the Secondary Current Signal in the Plasma [Текст] / Schavlev, V. E., Trushnikov, D.N., Mladenov, G. M. // Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation. – 2012. – P. 224.
101. Trushnikov, D. N. Investigation of Processes in the Keyhole of Electron-Beam Welding by Monitoring the Secondary Current Signal in the Plasma [Текст] / Trushnikov, D. N., Shchavlev, V. E., Mladenov, G. M., Krotov, L. N. // In In-situ Studies with Photons, Neutrons and Electrons Scattering II. – 2014. – P. 217-230. Springer International Publishing.
102. Richards, A.D. Continuum modeling of argon radio frequency glow discharges [Текст] / Richards A. D., Thompson B. E., Sawin H. H. // Applied physics letters. – 1987. – Т. 50. – №. 9. – С. 492–494.
103. Щавлев, В.Е. Математическая модель датчика вторичного тока в плазме для контроля фокусировки электронного пучка [Текст] / Щавлев В.Е., Трушников Д.Н., Южаков А.А. // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (58). – С. 025-029.

104. Щавлев, В.Е. Датчик контроля фокуса луча при электронно-лучевой сварке [Текст] / Щавлев В.Е., Трушников Д.Н. // Известия Тульского государственного университета. – 2015. – Вып. 6, ч. 2. – С. 281-290.

105. Chow, C.W.K Signal filtering of potentiometric stripping analysis using Fourier techniques [Текст] / Chow C.W.K., Davey D.E., Mulcahy D.E. // Analytica Chimica Acta. – 1997. – No 338. – P. 167-178.

106. Trushnikov, D.N. Weld formation control at electron beam welding with beam oscillations [Текст] / Trushnikov D. N., Koleva E., Mladenov G., Sherbakov A. V. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2014. – № 3. – С. 224-230.

107. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов [Текст] / В. Я. Ротач. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2008. – 396 с.

108. Лукас, В.А. Теория автоматического управления [Текст] / В.А. Лукас – М.: Недра. – 1990. – 416 с.

109. Язовских, В.М. Тепловые процессы при электронно-лучевой сварке круговых швов [Текст] / В.М. Язовских, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Сварка и диагностика. – 2012. – № 5. – С. 26-31.

110. Бочаров, А.Н. Определение ширины плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению при электронно-лучевой сварке [Текст] / Бочаров А. Н., Мурыгин А. В. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2005. – №. 4. – С. 78-84.

111. Казаков, В.А. Состояние и развитие ЭЛС в производстве аэрокосмической техники [Текст] / В.А. Казаков // Сварочное производство. – 1994 – №11. – С. 2-5.

112. Пат. 2532626 Российская Федерация, МПК В23К 15/02. Способ электронно-лучевой сварки / Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Лялин А.Н., Пискунов А.Л., Щавлев В.Е. № 2013113445/02; заявл. 26.03.2013; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31.