

Министерство образования Российской Федерации  
Сибирская аэрокосмическая академия  
имени академика М. Ф. Решетнева

В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин,  
Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверман

# УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

Красноярск  
2000

УДК 621.791.72  
ББК 30.61  
У 66

Рецензент доктор технических наук, профессор В. И. Пантелеев

Печатается при содействии Красноярского краевого фонда науки

**Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко,**  
**У 66 А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверман; Под ред.**  
**В. Д. Лаптенка. – Красноярск: САА, 2000. 234 с.**  
**ISBN 5–86433–121–X**

В монографии систематизированы сведения о принципах контроля информации и системах управления процессом электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Изложены физические основы ЭЛС, принципы позиционирования электронного пучка по стыку свариваемого соединения, контроля плотности распределения электронного пучка, управления глубиной проплавления. Проведен анализ помехозащищенности устройств управления ЭЛС, изложены вопросы их технической реализации с использованием микропроцессорной техники и микроЭВМ.

Работа предназначена для инженеров, студентов и научных работников, специализирующихся в области технологии и оборудования сварочного производства.

**ББК 30.61**

ISBN 5–86433–121–X

© Сибирская аэрокосмическая академия  
имени академика М. Ф. Решетнева, 2000

## Предисловие

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) получила широкое распространение в различных отраслях машиностроения. ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии, позволяет соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 до 400 мм и более и обладает широкими технологическими возможностями. Малый объем литого металла и кратковременность теплового воздействия при ЭЛС обеспечивает незначительные термические деформации соединяемых деталей. Большие технологические возможности ЭЛС достигаются за счет гибкого управления процессом. К таким возможностям относятся реализуемость импульсного режима сварки, возможность перемещать пучок по поверхности свариваемого изделия с помощью быстродействующей отклоняющей системы по любому сложному контуру. При этом многие сварочные задачи могут решаться без перемещения пушки или обрабатываемого изделия и сравнительно легко программироваться. Технологические возможности ЭЛС значительно расширяются по мере совершенствования средств управления процессом. Установки для ЭЛС как объект автоматизации представляют собой сложный комплекс, в который входят электромеханические манипуляторы, вакуумное оборудование и мощное энергетическое оборудование. Высокая скорость сварки (до 25 мм/с), ограниченные возможности визуального наблюдения создают большие трудности оператору в управлении процессом сварки. Поэтому стремление к максимальной автоматизации процесса ЭЛС вполне закономерно. В настоящее время развитие средств автоматического управления процессом ЭЛС осуществляется как по пути совершенствования локальных регуляторов, используемых для стабилизации и управления отдельных параметров процесса, так и по пути создания комплексных систем управления, осуществляющих взаимосвязанное регулирование параметров процесса с целью формирования качественного сварного соединения. Комплексный подход реализуется с использованием микропроцессорной техники и микроЭВМ и накладывает определенные требования на локальные системы. Эти системы развиваются по пути расширения функциональных возможностей, повышения точности и надежности функционирования, воспроизводимости характеристик, осуществления контроля достоверности информации и работоспособности в условиях действия помех, самодиагностики. Они должны предусматривать возможность подключения к комплексным системам управления, АСУ, ГПС. Последние достижения по использованию явлений вторично-электронной эмиссии и рентгеновского излучения, сопутст-

вующих электронно-лучевому процессу, позволили создать качественно новые устройства контроля и управления. Исследованию и созданию таких систем управления посвящена настоящая работа.

В книге приведены результаты исследований, проведенные в основном авторами. Для обобщений и сравнения использовались опубликованные ранее материалы.

В. Д. Лаптенком написаны: глава 1; совместно с В. Я. Браверманом – главы 2 и 7; совместно с А. В. Мурыгиным – главы 3–5, 7; совместно с Ю. Н. Серегиним – главы 6 и 7.

# Глава 1

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

### 1.1. Физические основы электронно-лучевой сварки

При ЭЛС для нагрева и расплавления металла используется энергия, получаемая в результате бомбардировки свариваемого изделия ускоренными электронами, сформированными в узкий пучок. При попадании на поверхность свариваемых деталей электроны тормозятся и их кинетическая энергия, равная  $E = U I$ , где  $U$  – ускоряющее напряжение;  $I$  – ток пучка, преобразуется в тепловую, вследствие чего образуется сварочная ванна.

При воздействии пучка электронов сравнительно невысокой плотности мощности (до  $1 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>) процесс ЭЛС подобен процессу обычной электродуговой сварки. Поверхность сварочной ванны при этом мало деформируется и гидравлические процессы в объеме жидкого металла проявляются относительно слабо. Проплавление в этом случае существенно ограничено по глубине.

При повышении плотности мощности до  $10^9 \dots 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> развивается интенсивное испарение металла, поверхность ванны прогибается, и в жидком металле формируется парогазовый канал на всю глубину проплавления. Образование канала обусловлено давлением отдачи частично испаряемого металла и чем выше плотность мощности пучка, сильнее нагрев поверхности сварочной ванны, тем эффективнее передается энергия пучка электронов по всей толщине свариваемого металла. Достижение высокой плотности мощности пучка – необходимое условие для осуществления процесса ЭЛС толстолистовых металлов.

Формирование мощного электронного пучка осуществляется сварочной электронной пушкой с соответствующим источником высоковольтного питания и системами управления (рис. 1.1) [166]. Сварочная электронная пушка – достаточно сложный и совершенный электрический прибор. Поток электронов, эмитируемых катодом, ускоряется и предварительно формируется аксиально-симметричным электрическим полем и фокусируется рисунок на поверхности свариваемого изделия. Наиболее широко в сварочных пушках применяется комбинированная (электростатическая и электромагнитная) фокусировка. В пушках с такой фокусировкой пучка прожектор, состоящий из катода, управляющего (прикатодного) электрода и ускоряющего электрода (анода), формирует сходящийся поток электронов.

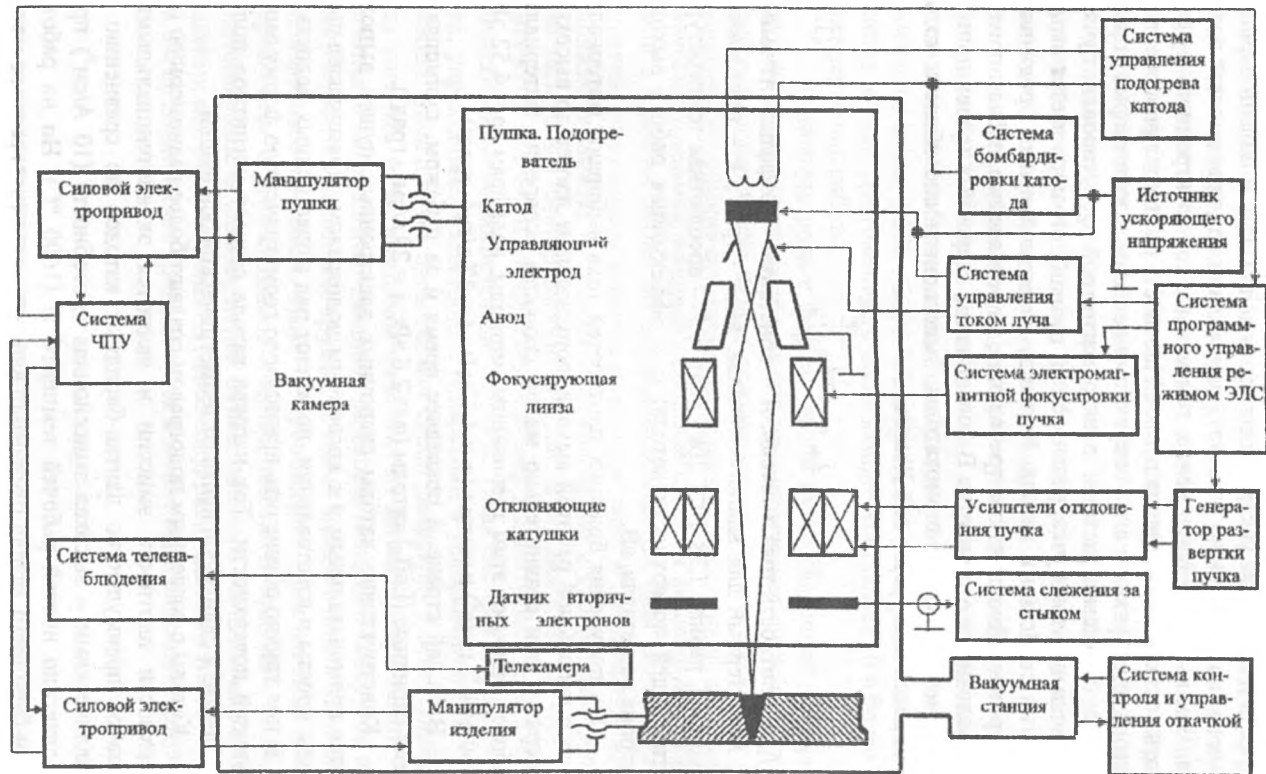


Рис. 1.1. Функциональная схема установки для ЭЛС

Мощность электронного пучка регулируется изменением его тока (при постоянном ускоряющем напряжении) путем подачи отрицательного (по отношению к катоду) напряжения на управляющий электрод. Чем выше это напряжение, тем меньше ток электронного пучка, вплоть до полного запираия пушки. Плотность распределения энергии электронного пучка по его поперечному сечению в зоне сварки управляется с помощью системы электромагнитной фокусировки пучка. Максимальный ток пучка, развиваемый пушкой, ограничивается эмиссионными свойствами катода. К катоду сварочной пушки предъявляются чрезвычайно жесткие требования, определяемые неблагоприятными условиями его работы. В большинстве сварочных пушек применяются металлические термокатоды, эмиссионная способность которых определяется формулой Дешмана

$$j_{эм} = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}, \quad (1.1)$$

где  $j_{эм}$  – плотность тока эмиссии;  $A$  – константа – коэффициент эмиссии, характерный для данного металла,  $\text{а/см}^2 \cdot \text{град}^2$ ;  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{23}$  Дж  $\text{град}^{-1}$ ;  $T$  – абсолютная температура эмитирующей поверхности катода;  $\phi$  – эффективная работа выхода электрона из металла, эВ.

Для получения больших плотностей тока выбирают материалы катода с небольшой работой выхода, допускающие нагрев до высоких температур при сравнительно малой скорости испарения материала. Наиболее отвечают этим требованиям металлы: вольфрам ( $\phi = 4,52$  эВ;  $A = 60 \text{ а/см}^2 \cdot \text{град}^2$ ) и тантал ( $\phi = 4,12$  эВ;  $A = 37 \text{ а/см}^2 \cdot \text{град}^2$ ).

В нашей стране, а последнее время и за рубежом, применяют лантан-баридные ( $\text{LaB}_6$ ) катоды ( $\phi = 2,6$  эВ;  $A = 29 \text{ а/см}^2 \cdot \text{град}^2$ ).

Конструктивно катоды сварочных электронных пушек выполняются прямонакальным и с косвенным подогревом. Прямонакальные катоды просты в изготовлении, но имеют ряд существенных недостатков. В них трудно обеспечить правильную геометрическую форму эмитирующей поверхности. Ток нагрева катода создает магнитное поле, приводящее к сдвигу оси пучка от геометрической оси пушки.

Катоды с косвенным подогревом создают более равномерную по поверхности плотность эмиссии и являются эквипотенциальными. Основное преимущество лантан-баридных катодов по сравнению с металлическими – высокая эмиссионная способность ( $10 \text{ А/см}^2$ ) при относительно низкой рабочей температуре ( $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Но на работу лантан-баридного катода оказывают влияние пары свариваемых мате-

риалов. Ввиду того что температура плавления некоторых тугоплавких элементов выше рабочей температуры катода, они осаждаются на поверхность и катод постепенно теряет свои свойства. Для увеличения продолжительности работы такого катода необходимо повышать его температуру до 1900...2000 °С. Время непрерывной стабильной работы такого катода в этом режиме определяется его испарением и ионной бомбардировкой, которая приводит к изменению геометрии эмитирующей поверхности вплоть до образования отверстия в катоде, приводящего к изменению пучка электронов.

Более стабильные параметры пучка обеспечивают массивные (толщиной 1...1,5 мм) металлические катоды, подогреваемые путем электронной бомбардировки. Температура нагрева таких катодов значительно выше (2000...2200 °С) и требуется в 2–3 раза большая мощность накала. Долговечность таких катодов составляет 10 и более часов непрерывной работы.

Основную роль в формировании пучка сварочной электронной пушки играет прикатодная электронно-оптическая система. Площадь рабочей поверхности катода для получения токов в десятки и сотни миллиампер обычно относительно велика, поэтому она не выбирается в качестве предмета, который отображается затем фокусирующей системой в качестве пятна на свариваемом изделии. Для создания такого предмета-кроссовера электростатическое поле в прикатодной области должно оказывать не только ускоряющее, но и собирающее действие на электроны, имитированные катодом. В большинстве случаев в прожекторах сварочных электронных пушек используются трех электродные аксиально-симметричные системы. Такая система состоит из катода, управляющего электрода с отверстием и ускоряющего электрода – анода. Анод обычно представляет собой диафрагму с отверстием. Ввиду того что термоэлектроны вылетают из катода с различными по величине и направлению начальными скоростями, они соберутся на оси не в точке, а в некотором кружке, который можно считать наименьшим поперечным сечением пучка – кроссовером. Чем меньше диаметр кроссовера и угол сходимости пучка, тем легче получить на изделии минимальное фокальное пятно. Вследствие того что тепловые скорости электронов распределены по Максвеллу, распределение плотности тока в пятне подчиняется кривой Гаусса и может быть описано формулой

$$j(r) = j(0)e^{-\frac{r^2}{r_e^2}}, \quad (1.2)$$

где  $r$  – радиальное расстояние от оси;  $r_e$  – радиус пучка, при котором плотность тока в радиальном направлении снижается в  $e$  раз.



У реальных генераторов пучков функция распределения плотности тока может отличаться от Гауссовой. Причины отклонения распределения от Гауссовой кривой лежат в неравномерности распределения плотности тока эмиссии на катоде и в погрешностях создания изображения иммерсионной системой. В этой связи существенно влияние деформации поверхности катода, неравномерности его нагрева, искажения центровки оптической системы.

Для большинства процессов требуются фокусные пятна весьма малых размеров с высокими плотностями тока, которые превосходят плотность тока, развиваемую катодами.

Другим требованием к генератору пучка электронов является возможность в широких пределах управлять током пучка. Если катод генератора работает в режиме насыщения, то, как вытекает из уравнения (1.1), управлять током пучка можно, изменяя температуру катода. Такой принцип управления реализован в диодной (двухэлектродной) пушке. Этот путь предъявляет жесткие требования к системе регулирования температуры катода, обладающей достаточно высокой инерционностью, которая, в зависимости от конструкции катодного узла, может достигать нескольких секунд. Достоинством указанного метода управления током пучка является неизменность его диаметра, так как величина эмитирующей поверхности катода остается неизменной.

Изменение мощности пучка электронов за счет изменения ускоряющего напряжения не находит использования, поскольку при этом необходимо соответствующим образом изменять ток электромагнитной фокусирующей линзы для стабилизации положения фокуса. Поэтому наибольшее применение получили трехэлектродные генераторы, в которых ток пучка регулируют изменением напряжения управляющего электрода относительно катода при неизменном ускоряющем напряжении. Если потенциал управляющего электрода относительно катода отрицателен и достаточно высок, то ток пучка равен нулю. С повышением потенциала управляющего электрода эмиссия электронов вначале происходит с небольшого центрального участка поверхности катода. С ростом потенциала возрастает и размер этого участка.

Ток пучка  $I$  можно выразить через напряжение на управляющем электроде  $U_s$  и напряжение запириания  $U_{sp}$  по формуле [165]

$$I = G(U_s - U_{sp})^{3/2}. \quad (1.3)$$

Коэффициент  $G$  учитывает форму электродов и плотность тока эмиссии.

Принцип регулирования тока электронного пучка указывает на

связь величины тока пучка с площадью эмитирующей поверхности катода. Кроме того, поскольку управляющий электрод обладает еще и фокусирующими свойствами, то при изменении тока изменяются условия формирования пучка и его эффективный диаметр. Практика показывает, что при изменении тока пучка с 5 до 300 мА эффективный диаметр пучка увеличивается с 0,2 до 0,8 мм. В этом заключается один из основных недостатков рассмотренного метода управления током пучка. При электронно-лучевой обработке материалов происходит интенсивное запыление катода, приводящее к изменению эмиссионных свойств, что может привести к изменению тока электронного пучка. Поэтому в сварочных установках обычно применяют системы стабилизации тока пучка. Стабилизация тока за счет изменения напряжения на управляющем электроде приводит к нестабильности эффективного диаметра электронного пучка, являющегося одним из важнейших параметров технологического процесса. Вместе с изменением эффективного диаметра пучка происходит изменение положения фокуса, приводящее к нестабильности параметров процесса и снижению качества сварки, обработки.

Для фокусировки пучка электронов на поверхности обрабатываемого изделия используют тонкие электромагнитные линзы, длины которых существенно меньше диаметра. Такие линзы создают осесимметричные магнитные поля. Фокусирующие элементы, не обладающие осевой симметрией (например, квадрупольные элементы) служат для коррекции поперечного сечения пучка. В простейшем случае магнитные линзы представляют собой бронированные катушки [165]. Магнитная индукция таких катушек пропорциональна магнитодвижущей силе  $I_k \cdot W_k$ . Существуют магнитные линзы без магнитопровода. Фокусное расстояние в таких магнитных линзах рассчитывается по формуле

$$f = \frac{g \frac{m_e U}{e}}{\int B^2(z) dz}, \quad (1.4)$$

где  $B(z)$  – значение магнитной индукции по оси линзы;  $m_e$  – масса электрона;  $e$  – заряд электрона;  $U$  – ускоряющее напряжение.

На практике при расчетах фокусного расстояния используют формулу [165]

$$f = \alpha K(S, D) \frac{U_r}{(IW)^2}, \quad (1.5)$$

где  $U_r$  – ускоряющее напряжение с релятивистской поправкой,

$$U_r = U(1 + 0,98 \cdot 10^{-6}U);$$

$K(S, D)$  – коэффициент, характеризующий геометрию полюсных нако-  
нечников;  $D$  – диаметр лучепровода;  $S$  – ширина немагнитного зазора  
линзы.

Минимальные фокусные расстояния, рассчитываемые по фор-  
муле

$$f_m = 0,5\sqrt{S^2 + 0,45D^2},$$

достигаются при ампервитках  $IW = 13,5\sqrt{U_r}$ .

Из выражения (1.5) видно, что положение фокуса можно регули-  
ровать за счет изменения тока фокусирующей линзы, что и осуществ-  
ляется на практике. Число витков в фокусирующей линзе обычно вели-  
ко, поэтому с позиции управления фокусирующая линза представляет  
собой активное и индуктивное сопротивление. В мощных сварочных  
пушках, кроме основной фокусирующей линзы, устанавливают также  
катушку динамической подфокусировки пучка, которая обычно ис-  
пользуется в системах слежения по стыку и сканирования пучка в фо-  
кальной плоскости. Катушка динамической подфокусировки пучка  
должна создавать импульсное магнитное поле, поэтому число витков  
этой катушки обычно на два порядка меньше числа витков основной  
магнитной линзы. Катушка динамической подфокусировки может быть  
размещена вместе с основной катушкой либо вынесена за пределы  
магнитной линзы.

При фокусировке или создании изображений с помощью магнит-  
ных линз возникают погрешности изображения. Теоретическое обсужде-  
ние этих погрешностей проведено в [72]. На диаметр пятна влияют сфе-  
рическая абберация, хроматическая абберация и астигматизм.

Погрешность за счет сферической абберации можно уменьшить  
путем рационального конструирования линзы и соответствующего  
выбора масштаба изображения. Малые значения сферической абerra-  
ции достигаются при больших значениях  $IW$ , когда  $f \rightarrow fm$ . Однако при  
выборе фокусного расстояния возникают ограничения из-за того, что  
между линзой и фокусом должны быть установлены дополнительные  
функциональные элементы, например отклоняющая катушка. Малые  
значения этой погрешности у длиннофокусных линз получают при  
больших полюсных зазорах, при отношении  $S/D = 1$ .

Погрешность за счет хроматической абберации возникает пото-  
му, что фокусное расстояние зависит от энергии электронов. Это на-  
кладывает ограничения на пульсации ускоряющего напряжения. Тре-

бования к постоянству ускоряющего напряжения зависят от назначения электронной пушки и составляют для пушек, предназначенных для обработки материалов,

$$\frac{\Delta U}{U} \leq 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3},$$

для сварочных пушек

$$\frac{\Delta U}{U} \leq 1 \cdot 10^{-2}.$$

Погрешности, обусловленные астигматизмом, возникают из-за неполной осевой симметрии конструкции линзы, несоосности пучка и погрешностей отклоняющих и центрирующих элементов. Результирующий астигматизм корректируют с помощью стигматоров.

Разброс тепловых скоростей электронов, геометрические особенности электронно-оптической системы, а также погрешности фокусирующей линзы приводят к тому, что сфокусированный на поверхности обрабатываемого изделия электронный пучок имеет некоторую плотность распределения энергии по его сечению, которая зависит от тока пучка и фокусного расстояния.

Для отклонения электронного пучка в мощных электронно-лучевых пушках используются электромагнитные отклоняющие системы, которые могут быть выполнены с магнитопроводами и без них. Применение магнитопроводов повышает эффективность отклоняющих систем благодаря более высокой концентрации магнитного поля и уменьшению полей рассеяния. Существенными недостатками отклоняющих систем с магнитопроводами является их низкое быстродействие, нестабильность отклонения, связанная с остаточной намагниченностью и зависимостью магнитных характеристик материалов от температуры. Для снижения потерь на вихревые токи детали магнитной системы уже при частоте 50 Гц набирают из листов трансформаторной стали, а при высоких частотах изготавливают из ферритовых материалов. Для динамического отклонения пучков с высокой частотой можно применять отклоняющие катушки, разработанные для телевизионной техники. Такие отклоняющие катушки позволяют реализовать отклонение пучка электронов с высоким быстродействием.

Магнитная индукция, создаваемая катушкой с магнитным сердечником, может быть приблизительно описана выражением

$$B_x = \mu_0 \alpha \frac{IW}{S}, \quad (1.6)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $I$  – ток в катушке;  $W$  – число витков;  $S$  – величина зазора;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, определяемый конструкцией катушки.

Для отклонения электронных пучков во взаимно перпендикулярных направлениях  $X$  и  $Y$  используют скрещенные двухполюсники. Отклоняющие системы с внутренним магнитопроводом имеют существенный недостаток, выражающийся в сильной связи между двумя парами катушек, расположенными на одном сердечнике.

Для расчета величины отклонения электронного пучка используют приближенные формулы и экспериментальные исследования в связи со сложностями расчета отклонения в неоднородных магнитных полях. Поэтому актуальной является задача получения формул для расчета отклоняющих систем.

При электронно-лучевой сварке кинетическая энергия электронов пучка используется для того, чтобы расплавить небольшие участки примыкающих к друг другу деталей в области стыка соединения. Особенностью электронно-лучевого способа является возможность создания высокой удельной поверхностной мощности в пятне пучка при достаточно высокой мощности всего пучка. Благодаря этому получают сварные соединения с отношением глубины шва к его ширине немного больше единицы, чего невозможно добиться другими способами сварки плавлением. При достаточной мощности пучка и удельной поверхностной мощности над местом непосредственной бомбардировки материала возникает локальная область повышенного давления пара с последующим образованием парогазового канала на всю глубину проплавления со стенкой из жидкого металла. В результате образования парогазового канала, по которому транспортируется энергия электронного пучка, возникает эффект глубокого проплавления.

Парогазовый канал окружен слоем расплава, который подвергается действию ряда сил. Гидростатическое давление зависит от высоты столба жидкости, ее плотности и угла между направлением оси канала и направлением силы тяжести. Поверхностное натяжение зависит от рода материала и падает с увеличением радиуса кривизны и ростом температуры расплава. Причиной того что парогазовый канал вообще может образовываться, является давление пара на внутреннюю поверхность канала. С поверхности расплава, обращенной к каналу, происходит испарение материала. Образуется поток пара, направленный к основанию канала. На поверхности расплава возникают тангенциальные силы в направлении потока пара. За счет этого происходит перенос массы расплавленного металла. Градиент температуры в расплаве вызывает появление подъемной силы. Совокупность всех сил, включая

действие на элемент объема силы инерции и трения, определяет форму канала. Изменение всего лишь одной из компонент может изменить форму канала. На практике установлено, что геометрия парогазового канала и окружающего его жидкого металла в общем случае испытывает быстрые квазипериодические колебания относительно некоторого среднего состояния. При этом каналы на части своей длины или на всей длине могут закрываться и образовываться вновь. Когда толщина свариваемой детали ограничена, а параметры пучка достаточно высоки, парогазовый канал пронизывает деталь на всю толщину. В этом случае возникает сквозное проплавление. Если под деталь подвести металлический коллектор, изолированный от детали, и соединить его с последней через гальванометр, то через него будет протекать ток части пучка электронов. Это говорит о том, что часть электронов проникает через парогазовый канал и достигает коллектора. Установлено, что энергия этих электронов близка к исходной энергии электронов, выходящих из пушки. Опыты регистрации сквозного тока показали, что сквозной ток испытывает во времени быстрые колебания. Высокочастотные изменения канала модулируются низкочастотными. Следовательно, при сварке имеют место сильные изменения геометрии слоя расплава с частотой от нескольких до 100 Гц, приводящие, помимо всего прочего, к чешуйчатой поверхности сварного шва и колебаниям глубины проплавления. Изменения параметров электронного пучка и скорости сварки существенно влияют на форму парогазового канала и параметры его колебаний. В процессе перемещения свариваемых деталей на переднем фронте сварочной ванны плавится твердый металл, а на заднем фронте постоянно застывает жидкий металл из расплава. В самом расплаве происходит перенос материала от фронта плавления к фронту застывания, при этом образуется сварной шов. Из-за сильного нагрева материала в зоне сварки часть его испаряется. При сварке сплавов, компоненты которых сильно различаются по давлению паров, испарению в большей степени подвергаются летучие компоненты, поэтому в материале сварного шва может измениться процентный состав компонентов.

При электронно-лучевой сварке не вся подводимая энергия непосредственно используется для нагрева. Наиболее существенные потери обусловлены отражением электронов. Доля энергии, отводимой с потоком пара, в общем случае составляет 0,5...2 %. Степень отражения электронов в значительной степени зависит от угла падения электрона к поверхности. Поскольку при падении электронного пучка на стенки парогазового канала угол к нормали имеет большое значение, коэффициент отражения высок и существует большая вероятность многократного отражения. Вероятность выхода отраженных электронов из паро-

газового канала тем меньше, чем выше отношение глубины к ширине канала, и поэтому потери энергии с отраженными электронами сильно падают с увеличением отношения глубины к ширине и составляют обычно несколько процентов. Лишь при очень малых отношениях глубины к ширине эти потери достигают 20 % для стали и 40 % для материалов, обладающих высокой плотностью. Потери энергии на тормозное рентгеновское излучение при ускоряющих напряжениях, используемых в сварочных пушках, обычно составляет 0,5...1,5 %.

При глубоком проплавлении эффективный КПД нагрева электронным пучком возрастает до 90...98 %.

## **1.2. Взаимосвязь параметров процесса и геометрии шва**

Возможность расчета геометрии шва при заданных параметрах источника нагрева или выбор этих параметров для получения необходимой геометрии шва является одной из важных задач электронно-лучевой сварки. Решение этих задач предполагает высокую степень изученности наиболее существенных физических явлений при сварке. Попытки расчета геометрии зон проплавления предпринимались на всех этапах развития метода ЭЛС, однако полного решения проблемы еще нет.

Сварной шов характеризуется прежде всего своей глубиной, шириной и их отношением. Существенную роль играет параллельность сторон зоны проплавления, радиус корневой части и другие геометрические параметры, влияющие на характер и величину сварочных деформаций, напряжений в сваренных изделиях. Некоторые режимы сварки могут сопровождаться характерными дефектами, такими как корневые дефекты, пористость, подрезы, непровары и др.

Для получения требуемой геометрии шва применяют различные технологические приемы: используют различные сканирования электронного пучка с программированием энергии вдоль траектории; применяют сварку с различными положениями фокуса; проводят осцилляцию электронного пучка, программирование изменения тока и фокуса при начале и окончании процесса сварки. Большое разнообразие приемов приводит к значительному количеству параметров процесса, которыми управляют при ЭЛС. К параметрам процесса ЭЛС в первую очередь относятся: ускоряющее напряжение, ток пучка, его эффективный диаметр, положение фокального пятна относительно поверхности свариваемого изделия, скорость сварки, вид траектории сканирования, амплитуды сканирования пучка по осям  $X$  и  $Y$ , амплитуда сканирования по фокусу, частота сканирования.

Процессы, протекающие при электронно-лучевой сварке, очень сложны. В силу этого полученные различными исследователями модели расчета параметров сварных швов могут быть использованы лишь для ориентировочных расчетов. Выбор параметров процесса осуществляется на основе экспериментальных исследований.

В работах [166; 165] приведен обзор формул для расчета глубины проплавления, характеризующихся различными допущениями. В простейшем случае принимается, что электронный пучок цилиндрический, форма канала задана, отсутствует рассеяние электронного пучка, ширина шва полагается равной диаметру пучка. Формулы расчета в этом случае очень приближены и дают погрешность около 100 %.

Разработаны также модели, основанные на использовании методов подобия и размерностей. Для использования на практике таких соотношений необходимо предварительное проведение и обработка огромного числа экспериментов, чтобы учесть все возможные ситуации при сварке и определить неизвестные постоянные. Такой подход также не оправдывает себя на практике.

Существенно лучшие результаты дает модель глубины проплавления, основанная на законе сохранения энергии для элемента поверхности канала проплавления. Из этого уравнения получают дифференциальное уравнение, описывающее форму канала проплавления [166], которое может быть решено только численными методами. В результате расчетов по указанной модели установлено, что максимальная глубина проплавления достигается при положении фокуса ниже поверхности свариваемого изделия на 65...75 % от глубины проплавления. Такая модель позволяет рассчитать геометрию проплавления при заданных параметрах электронного пучка в статическом установившемся состоянии. Погрешность расчета при этом составляет 25...35 %. Для более точного расчета необходимо учитывать потери на теплоотвод, рассеяние электронов и влияние жидкого металла в ванне.

Аналитические выражения геометрии канала проплавления пригодны лишь для ориентировочных расчетов. Их основное достоинство заключается в оценке влияния параметров процесса на глубину проплавления, позволяющее определить допуски на изменение этих параметров. Влияние на глубину проплавления ускоряющего напряжения и тока пучка может быть описано приближенным выражением [53]

$$h \approx IU^{\frac{3}{2}}.$$

Если другие параметры процесса, в том числе и мощность, постоянны, то сечение плавящегося материала остается постоянным.



Отсюда следует, что увеличение ускоряющего напряжения приводит к уменьшению ширины шва пропорционально  $\sqrt{U}$ . Тогда для отношения глубина–ширина шва получаем отношение

$$\frac{h_1/b_1}{h_2/b_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

т. е. отношение глубины шва к его ширине пропорционально ускоряющему напряжению. Результаты расчетов по рассматриваемой модели согласуются с данными экспериментов в широком диапазоне скоростей сварки для случаев, когда отношение глубина–ширина значительно. Если же это отношение невелико и рассеянием пучка в парогазовом канале можно пренебречь, то и влияние ускоряющего напряжения на глубину проплавления становится незначительным и глубина проплавления в этом случае зависит только от мощности пучка т. е. ускоряющее напряжение и ток пучка влияют на глубину проплавления совершенно равнозначно.

Из рассмотренных моделей следует, что при заданной общей мощности пучка проплавление шва тем глубже, чем меньше диаметр пучка и, следовательно, чем выше удельная поверхностная мощность в его пятне. Максимально достижимая удельная поверхностная мощность пропорциональна  $U$  [165]. Если фокусировка не сопровождается заметными искажениями, то при возрастании ускоряющего напряжения, но сохранении мощности пучка неизменной, следует ожидать увеличения глубины проплавления. При достаточной концентрации в паре капилляра отрицательных ионов, порожденных пучком, наряду с рассеянием пучка начинает проявляться фокусирующее действие ионов на пучок. Фокусирующий эффект может быть также следствием отражения электронов от стенок канала. Этот эффект может привести к существенному увеличению глубины проплавления. Экспериментально установлено, что при сварке с минимально возможными диаметрами пятен увеличение ускоряющего напряжения на 50 % при сохранении постоянными всех прочих условий приводило к увеличению отношения глубина–ширина в 2–3 раза. На практике всегда встает задача определения параметров пучка при заданных свойствах свариваемого материала и глубине проплавления шва. Эти параметры, как правило, находят в результате экспериментальных исследований.

При данной глубине проплавления находят оптимальные параметры процесса, дающие хорошее качество сварного соединения. Задачей технологического процесса является поддержание с требуемой точностью технологических параметров для получения требуемой вос-

производимости сварного соединения. Другим альтернативным решением задачи сварки является прямой контроль глубины проплавления средствами измерительной техники и стабилизация глубины проплавления за счет регулирования одного из параметров процесса, например тока пучка.

### 1.3. Автоматическое управление процессом электронно-лучевой сварки

Установки для ЭЛС как объект автоматизации представляют собой сложный комплекс, в который входят прецизионное электромеханическое высокопроизводительное вакуумное и мощное энергетическое оборудование. Высокая скорость сварки, ограниченные возможности для визуального наблюдения создают трудность оператору даже высокой квалификации в управлении процессом сварки. При ЭЛС ответственных изделий высокие требования предъявляются к качеству сварных соединений, надежности и воспроизводимости технологического процесса. Поэтому стремление к максимальной автоматизации процесса вполне закономерно. Задачам автоматизации ЭЛС посвящены многочисленные работы исследователей в России и за рубежом.

Работы по автоматизации ЭЛС начались в 60-х гг. С тех пор пройден значительный путь, и можно говорить об определенных достижениях. Первоначально работы посвящались созданию средств контроля и регулирования отдельных параметров процесса. В настоящее время разрабатывается комплексный подход к автоматизации ЭЛС с использованием микропроцессоров и микроЭВМ. Комплексная автоматизация и создание АСУ ТП ЭЛС предусматривает решение следующих основных задач: автоматизация основных и вспомогательных операций технологии ЭЛС; повышение качества ЭЛС за счет оптимизации его режимов; повышение надежности функционирования систем управления в результате применения современных методов диагностики и прогнозирования работоспособности; распознавание аварийных ситуаций и разработка алгоритмов функционирования систем в нестандартных ситуациях; выдача результирующей информации о ходе процесса сварки с фиксацией отклонений от заданных параметров режима с привязкой их к сварному шву.

Одной из главных технических проблем при создании систем управления ЭЛС является повышение помехозащищенности датчиков измерительных устройств и всей системы в целом. Проблемы, связанные с низкой помехозащищенностью, явились причиной неудовлетворительной работы ряда подсистем, таких как система слежения по сты-

ку сварного соединения и система стабилизации глубины проплавления. В настоящее время в связи с разработкой новых датчиков и применением микропроцессоров для обработки информации появились возможности существенного повышения помехозащищенности и работоспособности таких систем.

Задачи управления процессом ЭЛС можно свести к следующим:

- совмещение электронного пучка со стыком свариваемого изделия;
- стабилизация параметров сварного шва (глубины проплавления, ширины шва, радиуса корневой части);
- управление скоростью сварки и перемещением изделия;
- управление началом и окончанием процесса сварки;
- регистрация параметров процесса.

Каждая из указанных задач требует определенного набора средств и технологических приемов в зависимости от специфики конкретного технологического процесса ЭЛС. В научно-технической литературе указанные задачи рассматриваются как самостоятельные направления исследований, однако в технологическом процессе они взаимосвязаны.

### **1.3.1. Системы для совмещения электронного пучка со стыком свариваемого изделия**

Малая ширина сварного шва и большое отношение глубины и ширины шва требуют точного совмещения пучка электронов с плоскостью свариваемого шва. Погрешность позиционирования зависит от ширины зазора, толщины деталей, ширины шва в его корне и обычно не должна превышать 0,1...0,2 мм. В тех случаях когда идет обработка деталей малых размеров или когда координата стыка строго фиксирована, можно наводить электронный пучок на стык вручную с наблюдением с помощью оптической системы. Такой способ применяется при сварке больших партий одинаковых деталей или когда изготовление деталей ведется с высокой точностью по другим соображениям. Во всех остальных случаях требуется автоматическое позиционирование по стыку.

Автоматическое слежение за стыком при ЭЛС было введено в промышленную эксплуатацию после двадцатилетних исследований, что объясняется трудностью достижения надежности функционирования подобных систем. Значительные исследования в этом направлении проведены в Институте электросварки (ИЭС) имени Е. О. Патона (Украина), Сумском производственном объединении «Электрон», НПО

«Техномаш», Воронежском политехническом институте, фирмах «Сиаки» (Франция), «Гамильтон стандарт» (США), «Геркулес», «Штайгервальд» (ФРГ), «Мицубиси дэнки», «Итами сейсакусе» (Япония). Для наведения и позиционирования электронного пучка относительно стыка были использованы различные методы. Классификацию подобных систем принято проводить по типу датчика положения стыка. Рассмотрим основные типы систем наведения электронного пучка на стык.

#### **Автоматическое наведение на стык с помощью механических, электромагнитных и оптических датчиков стыка**

Положение стыка непосредственно перед зоной сварки можно определять с помощью механического датчика стыка (щупа) [165]. Однако применение механических датчиков стыка требует разделки кромок или специального технологического выступа. Кроме того, низкая чувствительность, дребезг контактов, вибрации затрудняют применение подобных датчиков. Поэтому механические датчики промышленного применения не нашли.

Удовлетворительную точность обеспечивает бесконтактный способ определения положения стыка с помощью электромагнитного датчика положения стыка на базе дифференциального феррозонда [38–46; 113; 114]. Принцип действия системы слежения с феррозондовым датчиком стыка заключается в наведении магнитного поля высокой частоты в свариваемое изделие и выделение с помощью датчика информации о положении стыка, преобразования ее и передачи на электропривод исполнительного механизма, осуществляющего коррекцию положения электронно-лучевой пушки. Система обеспечивает автоматическое наведение электронного пучка на стык свариваемого изделия с точностью  $\pm 0,2$  мм при скорости ухода стыка  $0,72$  мм/с. С целью ограничения теплового воздействия со стороны сварочной ванны датчик устанавливается на расстоянии  $50$  мм от места сварки. Испытания, проведенные при электронно-лучевой сварке [104], выявили пригодность использования феррозондовых электромагнитных датчиков для наведения электронного пучка на стык. Были выявлены недостатки, ограничивающие применение указанных датчиков. Один из недостатков заключается в воздействии электромагнитного поля датчика на электронный пучок. При этом электронный пучок получает колебания с амплитудой до  $5$  мм вдоль стыка на частоте возбуждения электромагнитного датчика. Это влияние удалось компенсировать за счет введения аналогичных колебаний противоположной полярности с помощью электромагнитной отклоняющей системы электронно-лучевой пушки.

Другой существенный недостаток электромагнитного датчика связан с его опережающим положением относительно пучка электронов, в результате чего возникает методическая погрешность. Одним из возможных способов устранения указанной погрешности является введение коррекции по скорости ухода стыка в закон регулирования [106].

Недостатком электромагнитных датчиков является необходимость стабилизации расстояния между датчиком и свариваемым изделием. Для этой цели разработан способ контроля расстояния датчика, позволяющий контролировать и стабилизировать это расстояние с погрешностью  $\pm 0,3$  мм.

Самый существенный недостаток всех датчиков, жестко связанных с электронно-лучевой пушкой, заключается в том, что такие датчики контролируют положение электронно-оптической оси пушки относительно стыка сварного соединения. Но при этом положение электронного пучка не обязательно должно совпадать с электронно-оптической осью пушки в силу влияния различных электромагнитных полей и неточности юстировки пушки. Поэтому при использовании таких датчиков приходится решать еще и задачу стабилизации электронного пучка по электронно-оптической оси пушки.

Для автоматического ведения пучка по стыку можно использовать оптическое изображение пучка и стыка [10; 12; 26; 121; 188]. В устройстве [188] для определения положения стыка предлагается использовать оптические преобразователи, состоящие из матрицы фоторезисторов, соединенных в мостовую схему. В качестве источника света используется сварочная ванна, интенсивность свечения которой зависит от отклонения стыка. Выдаваемый оптическим преобразователем сигнал используется для коррекции положения пучка.

Интенсивные работы проводились рядом исследователей по использованию промышленных телевизионных установок для наблюдения за процессом сварки и слежения за стыком сварного соединения [10; 121; 12]. В этих системах видикон с объективом размещался в вакуумной камере и жестко устанавливался на электронно-лучевой пушке. Для получения более контрастного изображения стыка свариваемое изделие освещается дополнительным источником света. В ряде случаев удавалось получить довольно четкое изображение сварочной ванны и стыка свариваемого изделия, но реализовать надежное слежение за стыком в процессе ЭЛС не удалось. В числе недостатков, присущих данному методу, следует отметить необходимость защиты оптической системы от напыления парами металла. Это проблема решается введением в состав установки механизма перемотки прозрачной плен-

ки. Другим существенным недостатком является засветка видикона излучением сварочной ванны, при этом снижается его разрешающая способность. Для определения относительного отклонения электромагнитного пучка и стыка в этом случае приходится находить координаты стыка и сварочной ванны. Точность метода оказывается не достаточной, так как размеры сварочной ванны оказываются большими и точно определить ее середину не удастся из-за различных помех, бликов и т. п. Поэтому телевизионные системы слежения за стыком не получили широкого применения. Возможно, телевизионная техника может быть использована для целей наведения на стык, если применять методы цифровой обработки информации.

### **Системы контроля и позиционирования с вторично-эмиссионными датчиками стыка**

Большое распространение в практике ЭЛС получили вторично-эмиссионные системы слежения за стыком, в которых используются отраженные (вторичные) электроны, улавливаемые специальным коллектором. Датчик вторичной эмиссии (коллектор) отличается простотой и высокой надежностью при интенсивной металлизации, возникающей в процессе сварки. Информационный сигнал получают при сканировании стыка электронным пучком. В большинстве вторично-эмиссионных устройств слежения за стыком применяют разделение во времени процесса сварки и зондирования. Для этого электронный пучок периодически с высокой скоростью выводят из сварочной ванны в направлении стыка и переводят в режим сканирования в непосредственной близости от пятна нагрева. Скорость сканирования должна быть достаточно высокой, чтобы исключить оплавление кромок [165]:  $V_{ск} > 10P$ , где  $V_{ск}$  – скорость сканирования, м/с;  $P$  – мощность пучка, кВт.

Для получения управляющего сигнала находят временное положение импульсов тока отраженных электронов. Устройства, использующие данный способ получения сигнала, в настоящее время представлены достаточно широко [17; 35; 37; 62; 124; 125; 143; 146; 149; 152; 163; 167; 172; 174; 175; 178; 182]. Такие системы содержат генератор сканирования пучка, блок формирования импульса стыка и блок коррекции положения пучка, которые присутствуют во всех системах и отличаются способами реализации. Генератор сканирования пучка обеспечивает его выброс из зоны сварки и линейное перемещение поперек стыка свариваемых деталей. Время зондирования стыка пучком обычно не превышает 500 мс и выбирается из соображений минимального влияния на сварочный процесс. Блок формирования импульса

стыка преобразует сигнал датчика вторичных электронов (ДВЭ) в напряжение, соответствующее изменению вторичной эмиссии в момент пересечения стыка электронным пучком. В зависимости от конкретного исполнения блока такой импульс может быть получен путем линейного преобразования с сохранением формы тока вторичной эмиссии либо преобразования его в прямоугольный импульс или импульс двойной полярности ключевыми схемами.

Блок коррекции положения пучка контролирует положение импульса стыка относительно развертки электронного пучка и формирует управляющий сигнал, корректирующий положение пучка относительно стыка свариваемого изделия. Обычно формирование управляющего сигнала производят по интегрирующему закону, так как при этом повышается точность системы за счет введения астатизма первого порядка, а также повышается помехозащищенность при пропадании сигнала от стыка над прихватками.

В процессе электронно-лучевой сварки на датчик вторичных электронов действуют различного рода помехи, вызывающие флуктуации сигнала. Источником помех может быть нестабильность тока пучка, ускоряющего напряжения, наличие поверхностных неровностей, неоднородность свариваемого материала, изменение зазора в стыке. Исследованию влияния помех на вторично-эмиссионный сигнал от стыка посвящены работы [60; 85; 87]. Существенная помеха возникает в результате влияния парогазового облака, возникающего при ЭЛС мощным пучком. Такое облако приводит к рассеянию пучка и увеличению его эффективного диаметра. Кроме того, как указывается в работах [86; 88], выброс пучка вперед стыка сопровождается спадом сигнала вторичной эмиссии. Появление флуктуаций сигнала датчика также вызывается испарением металла при перемещении пучка по контуру сканирования. В этих работах указывается, что решение задачи помехозащищенности является одной из главных проблем при создании систем слежения по стыку. Одним из способов снижения влияния пульсаций тока пучка на помехозащищенность вторично-эмиссионного датчика является синхронизация начала поискового движения с фазой промышленной сети при максимальном значении напряжения на выпрямителе [40].

Повысить помехозащищенность системы слежения можно, если в период обнаружения стыка снижать мощность пучка [45; 74; 142]. В ИЭС имени Е. О. Патона разработана система слежения за стыком при ЭЛС «Прицел-4», работающая с модулированным источником питания мощностью 15, 60 и 120 кВт [74]. В этих источниках питания на короткое время (2 мс) номинальная мощность пучка снижается до 100 Вт.

В момент сканирования стыка пучком пониженной мощности производится его динамическая фокусировка. Широкое применение систем с модуляцией тока пучка затруднено из-за необходимости переработки существующих источников питания, высоких требований к стабильности и быстрдействию устройств модуляции.

В ряде работ [1; 2; 134; 141; 195] предлагается использовать дифференциальный вторично-эмиссионный датчик положения стыка, содержащий два симметрично расположенных коллектора вторичных электронов, включенных дифференциально в измерительное устройство. В этом случае сканирующее устройство обеспечивает только вынос электронного пучка из сварочной ванны в зону стыка, сканирование поперек стыка при этом не требуется. Дифференциальный датчик реагирует на асимметрию распределения плотности вторичной эмиссии при смещении пучка от оси стыка. Как правило, для работы дифференциального датчика требуется V-образная разделка кромок, которая имеется только в специальных случаях.

Особое место среди вторично-эмиссионных систем занимают телевизионные системы наблюдения и слежения за стыком. Особенность таких систем заключается в том, что вместо видикона используется вторично-эмиссионный датчик [7; 59; 71; 135; 182; 194]. Сканирование пучка электронно-лучевой пушки осуществляется от генераторов кадровой и строчной развертки телевизионного приемника. Сигнал датчика вторичной эмиссии используют для модуляции яркости. При этом на телевизионном приемнике получают изображение сварочной ванны и поверхности изделия в окрестностях зоны сварки. Достоинством таких систем является совмещение функций наблюдения за ЭЛС и слежения за стыком. Недостатком является высокая длительность кадровой развертки (20 мс). Такое время вывода пучка из сварочной ванны приводит к дефектам типа непровара. Сложность совмещения процесса наблюдения с процессом ЭЛС заключается еще и в том, что для хранения изображения кадра требуется ОЗУ емкостью несколько сот килобайт и система записи и считывания информации, т. е. в состав телевизионной системы наблюдения должна входить микроЭВМ с необходимым объемом ОЗУ. Одним из недостатков способа являются помехи, связанные с модуляцией яркости изображения за счет пульсаций тока электронного пучка.

### **Системы контроля и позиционирования с рентгеновским датчиком стыка**

При взаимодействии электронного пучка с материалом электроны в результате торможения теряют свою энергию. Этот процесс со-



проводится возбуждением рентгеновского излучения, локализованного в месте взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым материалом. Рентгеновские лучи распространяются точно по прямым линиям, их нельзя отклонить электрическими и магнитными полями. Они проходят сквозь пары металлов с минимальным ослаблением. Испытания рентгеновских датчиков различного типа показали, что они обладают более высокой помехозащищенностью по сравнению с вторично-эмиссионными датчиками, что свидетельствует о перспективности их применения [61; 154]. Высокая помехозащищенность рентгеновских датчиков связана еще и с тем, что они гальванически развязаны от сварочного оборудования и легко экранируются.

Рентгеновские датчики стыка используются в системах слежения с предварительной записью траектории стыка [159; 182; 185] и в системах слежения на рабочем токе. В настоящее время рентгеновские датчики положения стыка применяются достаточно широко. С начала 80-х гг. такими датчиками комплектуются системы слежения за стыком в новых разработках машин для ЭЛС японских фирм «Мицубиси дэнки» и «Итаи сейсакусе» [158; 159; 192] и фирмы «Штайгервальд» (ФРГ).

При сварке металлов больших толщин существует возможность контролировать положение стыка по рентгеновскому излучению из канала проплавления. Для получения такой информации используют коллимированные датчики рентгеновского излучения, ориентированные на канал проплавления [21; 24; 30; 31; 173; 182; 189]. В устройстве [182] для получения сигнала от стыка электронный пучок периодически сканирует поперек стыка. Возникающее при этом рентгеновское излучение регистрируют коллимированным рентгеновским датчиком, ориентированным на канал проплавления через стык соединения. В устройстве [21] в качестве датчика рентгеновского излучения используют рентгено-телевизионный видикон или рентгеновский детектор на основе микроканальных пластин.

Следует отметить, что высокий уровень помех, связанных с колебаниями канала проплавления, затрудняет получение информации о положении стыка. Это приводит к сбоям слежения по стыку. Повышение помехозащищенности таких датчиков достигается за счет использованием метода частотной селекции [31] и применения дифференциального рентгеновского датчика.

### Методы выделения сигнала от стыка

В большинстве устройств слежения за стыком для выделения информации сигнал датчика подвергается обработке различными мето-

дами. Наиболее характерным для систем с поисковым сканированием является фазоимпульсный метод выделения сигнала. При этом методе импульс от стыка отделяется от постоянной составляющей и нормируется по длительности и амплитуде. Его фаза сравнивается с характерной точкой развертывающего напряжения, обычно соответствующей нулевому току в отклоняющей системе. По величине смещения импульса от этой точки определяется отклонение пучка относительно стыка. Следует отметить, что устойчивое выделение сигнала возможно при условии превышения амплитуды сигнала над помехой в 5–10 раз. В противном случае могут происходить сбои слежения. Помехи приводят к необходимости включения в устройство слежения пороговой схемы, уровень срабатывания которой должен находиться в определенном соотношении с величинами полезного сигнала и помехи. Предполагая, что флуктуация амплитуды сигнала и помехи подчинены нормальным законам распределения Гаусса, можно определить оптимальный пороговый уровень  $\gamma_n$ , при котором обеспечивается максимальная защищенность от помех [150]:

$$\frac{\gamma_n}{A} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma_n}{A^2} \ln 2N^2, \quad (1.7)$$

где  $A$  – математическое ожидание сигнала;  $\sigma_n$  – дисперсия помехи;

$$N = \frac{T_3}{\tau_n},$$

где  $T_3$  – длительность цикла сканирования зоны обзора;  $\tau_n$  – длительность импульса сигнала от стыка.

Из этого следует, что системы слежения с малой зоной обзора более защищены от помех.

В работе [151] предложен фазоимпульсный способ выделения сигнала от стыка, при котором, с целью устранения фазовых искажений, вносимых отклоняющей системой пушки, обрабатываются импульсы от стыка, формируемые во время прямого и обратного ходов пучка.

При корреляционном способе обработки сигнала от стыка используется не фаза импульса, а разность фаз нескольких импульсов. Так определяется взаимокорреляция нескольких импульсов от стыка при известных параметрах развертки [130]. В ИЭС имени Е. О. Патона разработаны устройства автоматического совмещения пучка со стыком, реализующие корреляционный метод обработки сигнала стыка: У868, У890, СУ158, СУ182. В этих устройствах временной интервал

между импульсами от стыка измеряется с помощью многоотводных линий задержки, реализованных на регистрах сдвига. Сравнительные испытания систем слежения за стыком с фазоимпульсным и корреляционным методом выделения информации не смогли обнаружить существенного преимущества метода корреляционной обработки сигнала [166]. При мощностях пучка 60...300 Вт и величине зазора в стыке 0,2...0,3 мм процесс слежения шел устойчиво. При величине зазора до 0,1 мм происходили сбои слежения.

Наиболее существенное увеличение помехозащищенности дает метод синхронного накопления. Сущность метода заключается в следующем. Электронный пучок периодически сканирует стык. В дискретных точках производят измерения показаний датчика и запоминание информации. Процесс сканирования и запоминания повторяется некоторое количество раз, после чего показания одноименных точек усредняются. Ввиду того что сигнал периодичен, а помеха – нет, превышение сигнала над помехой будет расти в каждой  $i$ -й ячейке накопителя с увеличением числа циклов зондирования. Можно определить требуемое число накоплений, необходимое для обеспечения заданной помехоустойчивости, при известном начальном отношении сигнал/помеха из формулы [162]

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{n}{2} \rho_0\right] \frac{1}{\sqrt{\frac{n}{2} \rho_0}},$$

где  $P_{\text{ош}}$  – вероятность того, что накопленное значение помехи будет больше сигнала от стыка;  $n$  – число накоплений;  $\rho_0$  – начальное отношение сигнал/помеха.

Метод синхронного накопления обычно реализуется с помощью ЭВМ и позволяет наиболее полно использовать информационные свойства сигнала от стыка. С использованием этого метода реализованы системы слежения по стыку [68; 73; 138] на микропроцессорах. Исследования отечественных и зарубежных авторов показали, что без применения специальных методов, повышающих помехозащищенность систем слежения по стыку, не удастся обеспечить требуемую надежность таких систем. Применение микропроцессоров и микроЭВМ позволяет создавать системы слежения по стыку, отвечающие требованиям помехозащищенности, надежности и удобства в эксплуатации. По данным специалистов французской фирмы «Сиаки», практически все электронно-лучевые установки этой фирмы, применяемые в авиационной промышленности, имеют микропроцессорное управление [191].

С начала 80-х гг. электронно-лучевые установки с компьютерным управлением выпускаются фирмами ФРГ [169; 184], Японии [158; 159; 192], США [170].

### 1.3.2. Системы контроля и управления энергетическими параметрами электронного пучка

Энергетические параметры электронного пучка: ускоряющее напряжение, ток электронного пучка и плотность распределения энергии по его сечению – являются основными энергетическими характеристиками процесса электронно-лучевой обработки. Без контроля и стабилизации указанных параметров невозможно необходимое качество технологического процесса. Если системы контроля и стабилизации ускоряющего напряжения и тока в настоящее время достаточно хорошо отработаны, то задача контроля и стабилизации плотности распределения энергии по сечению электронного пучка требует своего решения.

Мощность электронного пучка равна  $q = U I$ . Если известен диаметр электронного пучка  $d$ , то можно получить удельную мощность, которая является одним из важнейших параметров процесса:

$$q_2 = \frac{UI}{\pi d^2 / 4}.$$

В зависимости от величины удельной мощности при одинаковой погонной энергии можно получить различную конфигурацию зоны обработки. Наиболее существенным и одновременно наиболее трудно определяемым параметром электронного пучка является его эффективный диаметр.

Существует много различных способов экспериментального определения эффективного диаметра электронного пучка. Наиболее простым является метод вращающегося зонда [80; 128]. Сущность метода состоит в том, что тонкий вращающийся зонд, выполненный в виде вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм, пересекает электронный пучок перпендикулярно его оси и отбирает на себя часть его тока. По кривой зондового тока (зондовой характеристике) можно судить о диаметре пучка. Экспериментальные данные подтверждают, что распределение плотности тока по сечению электронного пучка с достаточной степенью точности описывается нормальным законом распределения [148].

В тех случаях когда диаметр электронного пучка невелик, для измерения его используют пленочный зонд, устанавливаемый между двух изолированных пластин. Толщина такого зонда составляет 1 мкм

[148]. Применение пленочных зондов позволяет исследовать электронные пучки, размеры которых не превышают 5...20 мкм. Зондовая характеристика еще не дает полного представления о плотности распределения энергии по сечению пучка. В работе [79] дается методика расчета радиального распределения плотности энергии по нескольким зондовым характеристикам.

Проволочный зонд не долговечен, особенно если на него воздействует мощный электронный пучок. Поэтому ряд исследователей предлагает осуществлять контроль диаметра пучка путем его отклонения на металлический коллектор [6; 16; 19; 140], соединенный с обрабатываемой деталью через резистор. В этом случае с коллектора, имеющего размеры, превышающие диаметр пучка, во время его сканирования снимают интегральную характеристику плотности распределения энергии. Для контроля эффективного диаметра необходимо сделать отсчеты тока отклоняющей системы, пропорциональные перемещению пучка на край коллектора, в определенных точках, которые соответствуют некоторому начальному току коллектора и некоторому фиксированному току коллектора, определяемому по его максимальному значению. Разность отсчетов является диаметром электронного пучка. В устройстве [16], помимо контроля эффективного диаметра пучка, предлагается осуществлять его фокусировку на поверхности свариваемого изделия путем контроля диаметров на двух различных по высоте коллекторах. При известных расстояниях между коллекторами и свариваемым изделием рассчитывается ток фокусирующей системы. В устройстве [19] ток острой фокусировки рассчитывается по результатам измерения диаметров электронного пучка при двух фиксированных значениях тока фокусирующей системы. Следует отметить, что подобные вычисления и способы фокусировки пучка электронов на поверхности изделия на практике не применяются.

В работе [140] электронный пучок периодически отклоняют на круговой коллектор за время 1...2 мс в нескольких направлениях, что позволяет рассчитать радиальное распределение плотности энергии пучка.

Метод проволочного зонда и метод прямого края не обеспечивают необходимую точность измерения диаметра пучка из-за влияния отраженных электронов, которые воздействуют на измерения как путем отражения от зонда, так и при отражении от свариваемого изделия [122].

Более точные результаты получают при отклонении пучка на щелевую диафрагму или отверстие малого диаметра, под которыми размещен цилиндр Фарадея [4; 5; 20; 76; 126; 137; 139; 176; 179; 183;

187; 193]. Использование цилиндра Фарадея позволяет исключить влияние вторично-электронной эмиссии на процесс измерения. Для обработки информации в этих устройствах используется ЭВМ.

Проведены исследования влияния на параметры пучка ускоряющего напряжения, тока сварки, давления в вакуумной камере, дефектов в катоде. Установлено, что на геометрию пучка влияют изменения ускоряющего напряжения и тока электронного пучка. Фокусировка на малом токе не дает положительных результатов, особенно при сварке изделий больших толщин [186]. Отмечено также влияние на форму пучка изменения давления в вакуумной камере в диапазоне от 13 до 130 Па.

В работе [187] анализируется влияние на форму распределения энергии по сечению пучка различных дефектов катода. Начато создание экспертной системы для автоматической диагностики электронно-оптических систем пушек. Проведение такой работы особенно необходимо при использовании ЭЛС в автоматизированных технологических комплексах для крупносерийного и массового производства.

В ряде работ приводятся сведения об использовании дифференциального коллектора для измерения диаметра пучка [50; 120], содержащего два электрода, разделенных диэлектриком. Иногда такие коллекторы выполнены в виде термодпары. В этом случае при пересечении такого коллектора электронным пучком измеряется термоЭДС [13; 48].

Интересно предложение использовать матричный оптический датчик [157] для контроля плотности распределения энергии по сечению пучка. Такой датчик содержит коллектор со множеством отверстий и нижнюю пластину с фотоприемниками, эти пластины разделены флюоресцирующей прослойкой, содержащей центры флюоресценции в соответствии с расположением фотоприемников. Ячеистая структура позволяет более точно измерять сигнал после обработки данных о количестве сработавших фотоприемников. При использовании такого матричного датчика не требуется сканирования по нему пучка. Электронный пучок на некоторое время отклоняют на датчик и производят одновременное считывание показаний фотоприемников.

Оригинальное решение предложено в работе [41] – использовать вспомогательный электронный пучок для зондирования им технологического пучка. Выяснено, что вспомогательный пучок рассеивается при взаимодействии с пересекающим его технологическим пучком, причем по величине рассеяния можно судить о диаметре технологического электронного пучка. Предлагаемый способ является бесконтактным и в связи с этим лишенным основного недостатка, присущего всем остальным способам, в которых измерительный инструмент-зонд или коллек-

тор находится под воздействием мощного пучка электронов и в связи с этим изнашивается и выходит из строя.

Другой существенный недостаток, присущий всем рассмотренным способам, заключается в том, что, в силу определенных геометрических размеров датчиков, контроль диаметра пучка осуществляется на некотором расстоянии от обрабатываемой детали, что не позволяет совместить операцию контроля диаметра с операцией фокусировки, хотя такое совмещение требуется для оперативного контроля сварочного процесса. В настоящее время эти устройства используются или в исследовательских целях, или для диагностирования состояния электронно-лучевой пушки, а фокусирование пучка выливается в самостоятельную операцию, при этом диаметр технологического электронного пучка в зоне обработки не контролируется.

Этих недостатков лишен описанный в настоящей работе способ контроля геометрии электронного пучка по рентгеновскому излучению зоны обработки, позволяющий не только контролировать, но и регулировать диаметр технологического электронного пучка непосредственно в процессе обработки.

Рассмотрим способы фокусирования электронного пучка. Обычно под фокусированием понимается совмещение минимального диаметра пучка с поверхностью обрабатываемого изделия путем изменения тока фокусирующей линзы. Такая фокусировка обычно осуществляется в режиме малого тока, а при выходе в режим технологического тока производится дофокусировка изменением тока фокусирующей линзы на определенную величину, определенную технологическим процессом сварки.

Для фокусировки пучка могут быть использованы различные технологические приемы и оборудование. Часто используются системы наблюдения. Оператор, визуально контролируя размеры светящегося пятна на поверхности изделия, изменением тока фокусирующей линзы добивается его минимальных размеров. Такой способ субъективен и не обладает необходимой точностью.

Более точную фокусировку пучка можно осуществить с использованием аппаратуры, предназначенной для наведения электронного пучка на стык. Если наблюдать сигнал вторично-эмиссионного датчика стыка, то можно заметить, что его амплитуда зависит от диаметра электронного пучка. Фокусировку электронного пучка можно осуществлять, добиваясь максимальной амплитуды вторично-эмиссионных импульсов от стыка.

Известно, что острая фокусировка электронного пучка приводит к максимальной глубине проплавления, при этом имеют место колеба-

ния канала проплавления, максимальное испарение и колебания парогазового облака над сварочной ванной. В работах [51; 52] предлагается осуществлять контроль фокусировки электронного пучка по частоте пульсаций ионного тока, снимаемого с зонда, установленного вблизи зоны обработки.

Использовать пульсации тока вторичной эмиссии на частотах 3...25 кГц для фокусировки электронного пучка предлагается в работе [63]. При максимальной амплитуде переменной составляющей достигается максимальная глубина проплавления.

В работе [36] контроль фокусировки предлагается осуществить по минимуму тока вторичной эмиссии, снимаемому с датчика вторичных электронов, находящегося под отрицательным потенциалом.

Недостаток всех существующих методов фокусировки состоит в том, что добиваться максимальной глубины проплавления не целесообразно, поскольку необходимо добиваться оптимального качества сварного соединения. Максимальная глубина проплавления обычно связана с наличием корневых дефектов. Поэтому более правильно получить определенное значение диаметра пучка, при котором достигается хорошее качество сварного соединения.

### **1.3.3. Системы контроля и стабилизации глубины проплавления**

Задача контроля и стабилизации глубины проплавления актуальна для получения необходимого качества сварных соединений. В настоящее время она удовлетворительно решается лишь для случаев сквозного проплавления. В этом случае под сварочным швом устанавливается изолированный от свариваемого изделия коллектор. При сквозном проплавлении часть электронов достигает коллектора, и задача системы стабилизации глубины проплавления сводится к задаче поддержания некоторого тока коллектора, который имеет пульсирующий характер.

При сварке без сквозного проплавления определенная глубина проплавления достигается за счет поддержания основных параметров сварочного процесса на определенном уровне. Обычно эти параметры получают в результате экспериментальных исследований. Естественно, что отклонение этих параметров в силу различных причин приводит к ошибке по глубине проплавления. Для оценки влияния технологических параметров, таких как ускоряющее напряжение, ток пучка, скорость сварки, расстояние до пушки, ток фокусировки, строится уравнение регрессии, связывающее глубину проплавления с вариациями ука-



занных параметров [78]. Такое уравнение позволяет установить допуски на изменение параметров процесса при требуемой точности поддержания глубины проплавления.

Отдельные авторы предлагают осуществлять контроль глубины проплавления по пульсациям тока вторичной эмиссии.

В работах [132; 136] измеряют и выделяют переменную составляющую тока вторичной эмиссии с частотой более 200 Гц и по ее амплитуде судят о глубине проникновения пучка. В качестве датчика электронов используют цилиндр Фарадея, ориентированный на зону сварки.

Предлагается выполнять контроль глубины несквозного проплавления по температуре с обратной стороны шва [133]. Для этого осуществляют модуляцию тока, и по модуляции температуры, измеряемой фотоэлементом, судят о глубине проплавления. Аналогичное решение, только без модуляции тока, предлагается в работе [18].

Для контроля глубины проплавления используют рентгеновское излучение сварочной ванны [47; 145]. В работе [145] с помощью камеры-обскуры и рентгеновского видикона предлагается получать изображение канала проплавления при ЭЛС и измерять его геометрические характеристики, в том числе и глубину проплавления. Однако дальнейшего развития этот способ не получил.

В работе [29] предлагается использовать коллимированный датчик рентгеновского излучения для контроля и стабилизации глубины проплавления. Этот датчик ориентируют на дно канала проплавления под определенным углом к оси пучка. Недостаток способа заключается в том, что контролировать большую глубину проплавления не удастся из-за значительного ослабления рентгеновского излучения материалом свариваемого изделия. При малом уровне сигнала начинает сказываться фоновое рентгеновское излучение.

## **Выводы**

1. Анализ существующих устройств и систем автоматического управления процессом электронно-лучевой сварки показывает, что их развитие идет как по пути создания отдельных систем слежения по стыку, контроля геометрических параметров электронного пучка и фокусировки, систем управления глубиной проплавления, так и по пути объединения указанных систем в вычислительные комплексы с решением задач контроля и регистрации параметров процесса, оперативного управления им, решения вопросов оптимизации качества.

2. Наиболее перспективными являются системы слежения по стыку с вторично-эмиссионными и рентгеновскими датчиками. Существующие системы не обладают требуемой помехоустойчивостью и надежностью. Поэтому основной задачей является повышение помехоустойчивости и надежности функционирования систем за счет использования специальных технических решений и обработки информации.

3. Важной энергетической характеристикой электронного пучка является его эффективный диаметр, поэтому актуальна задача контроля и управления диаметром электронного пучка непосредственно в процессе электронно-лучевой сварки, обработки.

4. Существующие системы стабилизации глубины проплавления при ЭЛС эффективны лишь в случае сквозного проплавления, поэтому необходимо разработать новые принципы построения систем стабилизации глубины при несквозном проплавлении.

5. Выбор параметров и режимов электронно-лучевой сварки осуществляется путем экспериментальных исследований. Для того чтобы получать параметры процесса, близкие к оптимальным, приходится проводить большое количество пробных сварок. Задача значительного повышения производительности экспериментальных работ и оптимизации процесса ЭЛС может быть решена путем создания автоматизированного комплекса по оптимизации ее технологии.

Решению поставленных задач посвящена настоящая монография.

## Глава 2

# МЕТОД СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ПОЛОЖЕНИИ СТЫКА И ПЛОСКОСТИ ФОКУСИРОВКИ

Повышение помехозащищенности измерительных устройств положения стыка может быть достигнуто с использованием частотно-селективного метода для выделения информации. Применение частотно-селективных методов предполагает наличие в сигнале датчика гармонических составляющих, несущих требуемую информацию о положении стыка и фокусировке электронного пучка.

### 2.1. Математическая модель вторично-эмиссионного датчика положения стыка

Рассмотрим математическую модель вторично-эмиссионного датчика (ДВЭ) положения стыка. Датчик положения стыка – коллектор вторичных электронов (КВЭ) – в простейшем случае представляет собой металлическое кольцо с центральным отверстием, установленное на торце электронно-лучевой пушки на изоляторах (рис. 2.1).

При взаимодействии пучка электронов с поверхностью свариваемого изделия часть из них отражается, и вторичные, отраженные электроны попадают на коллектор вторичных электронов, что приводит к току через нагрузочный резистор  $R_k$ . Ток вторичной эмиссии определяется первичным током пучка электронов, коэффициентами вторичной эмиссии свариваемого изделия и геометрическими характеристиками ДВЭ, определяемыми углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

При попадании пучка электронов на различные неоднородности поверхности (зазор в стыке, бурт, разделка кромок, разнородные материалы и т. д.) происходит изменение вторично-эмиссионного тока. В случае пересечения пучком электронов зазора в стыке происходит уменьшение вторично-эмиссионного тока, причем положение минимума соответствует совмещению центра пучка с серединой зазора в стыке. На этом принципе работают вторично-эмиссионные датчики положения стыка.

Ток коллектора вторичных электронов можно представить выражением [83; 99]

$$I_k = I_n \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, y) j_n(x, y) dx dy, \quad (2.1)$$

где  $I_n$  – ток пучка электронов;  $\varphi(x, y)$  – эффективный коэффициент вторичной эмиссии;  $J_n(x, y)$  – нормированная плотность распределения тока пучка в координатах  $x, y$ , причем

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} j_n(x, y) dx dy = 1.$$

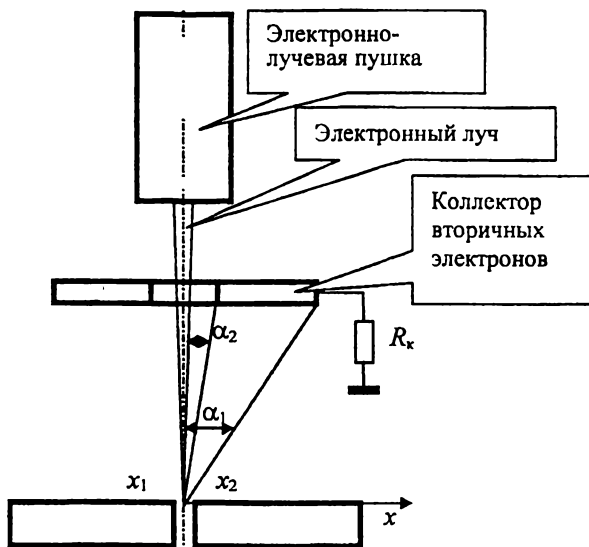


Рис. 2.1. Функциональная схема вторично-эмиссионного датчика положения стыка:  $x_1$  и  $x_2$  – положение кромок свариваемых деталей

Нормированную плотность  $J(x, y)$  обычно представляют нормальным законом распределения [148]

$$j_n(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\epsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\epsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (2.2)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – среднеквадратические отклонения по соответствующим осям;  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  – положение оси пучка в координатах  $x$  и  $y$ .

Если стык свариваемого соединения ориентирован вдоль оси  $y$ , тогда функция  $\varphi(x, y)$  не зависит от  $y$ , т. е.

$$\varphi(x, y) = \varphi(x).$$

Объединяя выражения (2.1) и (2.2) и учитывая, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\varepsilon_y)^2}{2\sigma^2}} dy = 1,$$

получим

$$I_k = \frac{I_n}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) e^{-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (2.3)$$

Для стыкового соединения свариваемых деталей, изображенного на рис. 2.1, коэффициент вторичной эмиссии равен

$$\varphi(x) = \begin{cases} K \cdot \varphi_{m1}, & -\infty \leq x \leq x_1, \\ 0, & x_1 < x < x_2, \\ K \cdot \varphi_{m2}, & x_2 \leq x \leq \infty, \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $\varphi_{m1}$  и  $\varphi_{m2}$  – коэффициенты вторичной эмиссии свариваемых деталей. Если детали из одного материала, то  $\varphi_{m1} = \varphi_{m2} = \varphi_m$ ;  $K$  – коэффициент, учитывающий геометрические характеристики коллектора вторичных электронов.

Ток вторичной эмиссии в этом случае определяется выражением

$$I_k = \frac{K \cdot I_n \varphi_m}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[ 1 - \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}} dx \right]. \quad (2.5)$$

По выражению (2.5) можно рассчитать статические характеристики зависимости тока коллектора от смещения стыка.

Для реализации метода синхронного детектирования придадим гармонические колебания параметрам  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ,  $I_n$  в соответствии с выражениями:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_m \sin \omega_1 t, \quad (2.6)$$

$$\sigma = \sigma_0 + |\Delta\sigma| + |\sigma_m \sin \omega_2 t|, \quad (2.7)$$

$$I_n = I_{n0} + I_{nm} \sin \omega_3 t, \quad (2.8)$$

где  $\varepsilon_0$  – рассогласование положений пучка и стыка;  $\varepsilon_m$  – амплитуда сканирования пучка поперек стыка;  $\omega_1$  – частота сканирования поперек стыка;  $\sigma_0$  – минимальное среднеквадратическое отклонение плотности

распределения пучка;  $\Delta\sigma$  – приращение  $\sigma_0$ ;  $\sigma_m$  – амплитуда сканирования по фокусу;  $w_2$  – частота сканирования по фокусу;  $I_{n0}$  – постоянная составляющая тока пучка;  $I_{nm}$  – амплитуда колебаний тока пучка;  $w_3$  – частота колебаний тока пучка;  $t$  – время.

В этих выражениях для простоты начальные фазы гармонических составляющих приняты равными нулю, что не оказывает влияния на полученные результаты.

Формула (2.5) с учетом выражений (2.6), (2.7), (2.8) будет иметь вид

$$I_k = \frac{I_{n0} + I_{nm} \sin \gamma}{(\sigma_0 + |\Delta\sigma| + \sigma_m \sin \beta) \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) e^{-\frac{(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin \alpha)^2}{2(\sigma_0 + |\Delta\sigma| + \sigma_m \sin \beta)^2}} dx, \quad (2.9)$$

где  $\alpha = w_1 t$ ;  $\beta = w_2 t$ ;  $\gamma = w_3 t$ .

Изменение тока коллектора во времени можно представить в виде кратного ряда Фурье от трех переменных [82]:

$$I_k(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{mnk} e^{-j(m\alpha + n\beta + k\gamma)}, \quad (2.10)$$

где коэффициенты ряда Фурье определяются формулой

$$C_{mnk} = \frac{1}{8\pi^3} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \beta, \gamma) e^{-j(m\alpha + n\beta + k\gamma)} d\alpha d\beta d\gamma. \quad (2.11)$$

С учетом (2.9) получим

$$C_{mnk} = \frac{1}{8\pi^3} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{I_{n0} + I_{nm} \sin \gamma}{(\sigma_0 + |\Delta\sigma| + \sigma_m \sin \beta) \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) e^{-\frac{(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin \alpha)^2}{2(\sigma_0 + |\Delta\sigma| + \sigma_m \sin \beta)^2}} \times \\ \times e^{-j(m\alpha + n\beta + k\gamma)} d\alpha d\beta d\gamma. \quad (2.12)$$

Соотношения (2.10) и (2.12) выражают математическую модель датчика вторичных электронов как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодических сигналов в параметрах электронного пучка. Математическая модель позволяет выявить составляющие сигнала датчика с частотами  $m\alpha + n\beta + k\gamma$ .

В тригонометрической форме ряд (2.10) будет иметь вид

$$I_k(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{d_{000}}{2} + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} d_{mnk} \cos(m\alpha + n\beta + k\gamma) +$$

$$+ b_{mnk} \sin(m\alpha + n\beta + k\gamma), \quad (2.13)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$d_{000} = \frac{1}{4\pi^3} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha, \beta, \gamma) d\alpha d\beta d\gamma, \quad (2.14)$$

$$d_{mnk} = \frac{1}{4\pi^3} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha, \beta, \gamma) \cos(m\alpha + n\beta + k\gamma) d\alpha d\beta d\gamma, \quad (2.15)$$

$$b_{mnk} = \frac{1}{4\pi^3} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha, \beta, \gamma) \sin(m\alpha + n\beta + k\gamma) d\alpha d\beta d\gamma. \quad (2.16)$$

В этом случае

$$C_{mnk} = \frac{1}{2}(d_{mnk} - jb_{mnk}).$$

Из выражений (2.13)...(2.16) видно, что ток вторичной эмиссии можно представить суммой постоянной составляющей (2.14) и гармонических составляющих (2.15), (2.16).

Если сканирование по  $\epsilon$ ,  $\sigma$  и  $I_n$  отсутствуют, т. е.  $w_1 = w_2 = w_3 = 0$ , то ряды (2.10), (2.13) вырождаются в соотношение (2.3).

Интерес представляет определение спектральных составляющих сигнала датчика, зависящих от положения пучка относительно стыка ( $\epsilon$ ) и положения фокуса относительно поверхности свариваемого изделия, которое характеризуется диаметром пучка  $\sigma$ . Для получения этих составляющих воспользуемся соотношением (2.5). Получение аналитического выражения интеграла, входящего в формулу, затруднено. Поэтому, произведя замену  $z = x - \epsilon$ , представим подынтегральное выражение в виде ряда Тейлора по степеням  $z$  в окрестности точки  $z = 0$ :

$$f(z) = e^{-\frac{z^2}{2\sigma}} = f(0) + f'(0)z + \frac{f''(0)}{2!}z^2 + \dots + \frac{f^n(0)}{n!}z^n + \dots,$$

где коэффициенты  $f^n(0)$  – значения производных  $f(z)|_{z=0}$ .

Ограничимся пятью членами ряда. Такое ограничение допустимо при  $|z| < \sigma$  и достаточно для иллюстрации описываемых процессов.

Тогда получим:

$$f(0) = 1, f'(0) = 0, f^{(2)}(0) = -\frac{1}{\sigma^2}, f^{(3)}(0) = 0, f^{(4)}(0) = \frac{3}{\sigma^4}.$$

Отсюда получим

$$e^{-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}} = 1 - \frac{1}{2\sigma^2}(x-\varepsilon)^2 + \frac{1}{8\sigma^4}(x-\varepsilon)^4.$$

Интеграл в выражении (2.5) определяется как

$$\int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{103\sigma}{60} - \frac{1}{2\sigma}\varepsilon^2 + \frac{1}{4\sigma^3}\varepsilon^4;$$

с учетом выражения (2.6) получим

$$\begin{aligned} I_{\kappa}(\alpha) = & \frac{kI_{\text{нФм}}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{1}{\sigma} - \frac{103}{60} - \frac{1}{4\sigma^4}\varepsilon_0^4 + \frac{1}{2\sigma^2}\varepsilon_0^2 + \right. \\ & + \left( \frac{1}{\sigma^2}\varepsilon_m\varepsilon_0 - \frac{1}{\sigma^4}\varepsilon_m\varepsilon_0^2 \right) \sin \alpha + \left( \frac{1}{2\sigma^2}\varepsilon_m^2 - \frac{3}{2\sigma^4}\varepsilon_m^2\varepsilon_0^2 \right) \sin^2 \alpha - \\ & \left. - \frac{1}{\sigma^4}\varepsilon_0\varepsilon_m^2 \sin^3 \alpha - \frac{1}{4\sigma^4}\varepsilon_m^4 \sin^4 \alpha \right]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Коэффициенты Фурье определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha) d\alpha = & \frac{kI_{\text{нФм}}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{2}{\sigma} - \frac{103}{60} - \frac{3}{16\sigma^4}\varepsilon_m^4 + \frac{1}{2\sigma^2}\varepsilon_m^2 - \frac{1}{2\sigma^4}\varepsilon_0^4 + \right. \\ & \left. + \left( \frac{1}{\sigma^2} - \frac{3}{2\sigma^4}\varepsilon_0^2 \right) \right], \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \frac{kI_{\text{нФм}}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \left( \frac{1}{\sigma^2}\varepsilon_m - \frac{3}{4\sigma^4}\varepsilon_m^3 \right) \varepsilon_0 - \frac{1}{\sigma^4}\varepsilon_m\varepsilon_0^3 \right], \quad (2.19)$$

$$a_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha) \cos 2\alpha d\alpha = \frac{kI_{\text{нФм}}}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{1}{8\sigma^4}\varepsilon_m^4 - \frac{1}{2\sigma^2}\varepsilon_m^2 + \frac{3}{2\sigma^4}\varepsilon_m^2\varepsilon_0^2 \right), \quad (2.20)$$

$$b_3 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha) \sin 3\alpha d\alpha = \frac{kI_{\text{нФм}}}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{4\sigma^4} \varepsilon_m^3 \varepsilon_0, \quad (2.21)$$

$$a_4 = \int_{-\pi}^{\pi} I_{\kappa}(\alpha) \cos 4\alpha d\alpha = \frac{kI_{\text{нФм}}}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{32\sigma^4} \varepsilon_m^4. \quad (2.22)$$



Остальные коэффициенты равны нулю.

Ток вторичной эмиссии, представленный рядом Фурье, будет иметь вид

$$I_{\kappa} = \frac{a_0}{2} + b_1 \sin \alpha + a_2 \cos 2\alpha + b_3 \sin 3\alpha + a_4 \cos 4\alpha, \quad (2.23)$$

где коэффициенты  $a_m, b_m$  определяются выражениями (2.18)...(2.22).

Анализ выражений (2.18)...(2.23) свидетельствует о том, что при сканировании лучом стыка в спектре сигнала датчика присутствуют составляющие, амплитуды которых зависят от величины рассогласования положения стыка  $\epsilon_0$ , а частоты пропорциональны  $\alpha = \omega_1 t$ .

Спектральный состав сигнала ДВЭ изображен на рис. 2.2. При этом амплитуды  $b_1$  и  $b_3$  при  $\epsilon_0 = 0$  равны нулю.

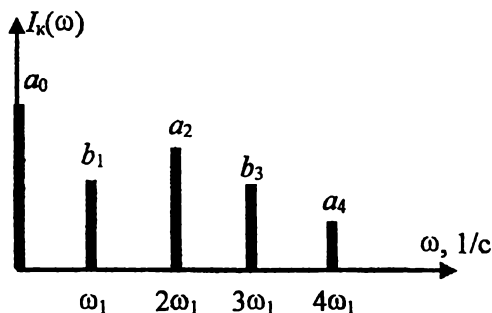


Рис. 2.2. Спектральный состав сигнала ДВЭ  
при  $\omega_1 \neq 0, \omega_2 = \omega_3 = 0$

Рассмотрим случай, соответствующий наличию гармонической составляющей в токе сканирующего пучка электронов. Для этого в выражение (2.17) подставим ток пучка в виде (2.8). Тогда

$$I_{\kappa}(\alpha, \gamma) = \frac{k\varphi_m}{\sqrt{2\pi}} \left\{ I_{n0} \left[ \frac{1}{\sigma} - \frac{103}{60} - \frac{1}{4\sigma^4} \epsilon_0^4 + \frac{1}{2\sigma^2} \epsilon_0^2 + \left( \frac{1}{\sigma^2} \epsilon_m \epsilon_0 - \frac{1}{\sigma^4} \epsilon_m^4 \sin^4 \alpha \right) \right] + I_{nm} \left[ \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{103}{60} - \frac{1}{4\sigma^4} \epsilon_0^4 + \frac{1}{2\sigma^2} \epsilon_0^2 \right) \sin \gamma + \left( \frac{1}{\sigma^2} \epsilon_m \epsilon_0 - \frac{1}{\sigma^4} \epsilon_m \epsilon_0^3 \right) \sin \alpha \cdot \sin \gamma + \left( \frac{1}{2\sigma^2} \epsilon_m^2 - \frac{3}{2\sigma^4} \epsilon_m^2 \epsilon_0^2 \right) \sin^2 \alpha \cdot \right. \right.$$

$$\times \sin \gamma - \frac{1}{\sigma^4} \varepsilon_m^2 \varepsilon_0 \sin^3 \alpha \cdot \sin \gamma - \frac{1}{4\sigma^4} \varepsilon_m^4 \sin^4 \alpha \cdot \sin \gamma \left. \vphantom{\frac{1}{\sigma^4} \varepsilon_m^2 \varepsilon_0 \sin^3 \alpha \cdot \sin \gamma}} \right\}. \quad (2.24)$$

Если принять  $\omega_3 \gg \omega_1$ , то суммирование по  $m$  может производиться и для значений  $m < 0$  при ограничении  $|-m\omega_1| < \omega_3$ . С учетом этого ток коллектора может быть представлен тригонометрическим рядом Фурье от двух переменных:

$$\begin{aligned} I_k(\alpha, \gamma) = & \frac{a_{00}}{2} + b_{01} \sin \gamma + b_{10} \sin \alpha + a_{11} \cos(\gamma + \alpha) + a_{11} \cos(\gamma - \alpha) + \\ & + a_{20} \cos 2\alpha + b_{21} \sin(\gamma + 2\alpha) + b_{21} \sin(\gamma - 2\alpha) + a_{31} \cos(\gamma + 3\alpha) + \\ & + a_{-31} \cos(\gamma - 3\alpha) + a_{40} \cos 4\alpha + b_{41} \sin(\gamma + 4\alpha) + b_{-41} \sin(\gamma - 4\alpha), \quad (2.25) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_{00} &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) d\alpha d\gamma = \frac{I_{n0}}{I_n} a_0; \\ b_{01} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \sin \gamma d\alpha d\gamma = \frac{I_{nm}}{2I_n} a_0; \\ b_{10} &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \sin \alpha d\alpha d\gamma = \frac{I_{n0}}{I_n} b_1; \\ a_{11} &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \cos(\alpha + \gamma) d\alpha d\gamma = \frac{I_{nm}}{2I_n} b_1; \\ a_{-11} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \cos(\gamma - \alpha) d\alpha d\gamma = -a_{11}; \\ a_{20} &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \cos 2\alpha d\alpha d\gamma = \frac{I_{n0}}{I_n} a_2; \\ b_{21} &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \sin(\gamma + 2\alpha) d\alpha d\gamma = \frac{I_{nm}}{2I_n} a_2; \\ b_{-21} &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \sin(\gamma - 2\alpha) d\alpha d\gamma = b_{21}; \\ a_{31} &= \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \cos(\gamma + 3\alpha) d\alpha d\gamma = \frac{I_{nm}}{2I_n} b_3; \end{aligned}$$

$$a_{-31} = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \cos(\gamma - 3\alpha) d\alpha d\gamma = -a_{31};$$

$$b_{30} = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \sin 3\alpha d\alpha d\gamma = \frac{I_{n0}}{I_n} b_3;$$

$$b_{41} = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \sin(\gamma + 4\alpha) d\alpha d\gamma = \frac{I_{nm}}{2I_n} a_4;$$

$$b_{-41} = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha, \gamma) \sin(\gamma - 4\alpha) d\alpha d\gamma = b_{41}.$$

Анализ выражения (2.25) с коэффициентами Фурье показывает, что спектральный состав сигнала датчика расширяется, причем появляются гармоники с боковыми частотами, являющиеся результатом амплитудной модуляции несущей на частоте  $\omega_3$  и огибающими с частотами  $\omega_1, 2\omega_1, 3\omega_1$  и т. д., при условии, что  $\omega_3 \gg \omega_1$ .

На рис. 2.3 представлен спектральный состав сигнала датчика.

Анализ рассматриваемых случаев свидетельствует о том, что при сканировании на выходе КВЭ возникает сигнал с детерминированным спектром, представленный составляющими, амплитуды которых зависят от положения фокуса относительно поверхности свариваемых деталей.

В математической модели датчика вторичной эмиссии присутствует коэффициент вторичной эмиссии  $\varphi(x)$ . Рассмотрим его математическое выражение для стыков различного типа. Представим коэффициент вторичной эмиссии в виде

$$\varphi(x) = K\varphi_m(x)\varphi_c(x), \quad (2.26)$$

где  $K = (1 - Q_k) \sin^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_2$ ;  $Q_k$  – коэффициент вторичной эмиссии материала коллектора [84];  $\alpha_1, \alpha_2$  – половины телесных углов (рис. 2.1);  $\varphi_m(x)$  – коэффициент вторичной эмиссии материала свариваемых деталей;  $\varphi_c(x)$  – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей соединения в стыке свариваемых деталей.

В случае стыкового соединения, изображенного на рис. 2.1,

$$\varphi_c(x) = \begin{cases} 1 & -\frac{\Delta}{2} > x > \frac{\Delta}{2}, \\ 0 & -\frac{\Delta}{2} < x < \frac{\Delta}{2}, \end{cases}$$

отсюда

$$\varphi(x) = \begin{cases} K\varphi_m & -\frac{\Delta}{2} \geq x \geq \frac{\Delta}{2}, \\ 0 & -\frac{\Delta}{2} < x < \frac{\Delta}{2}, \end{cases}$$

где  $\Delta$  – величина зазора в стыке.

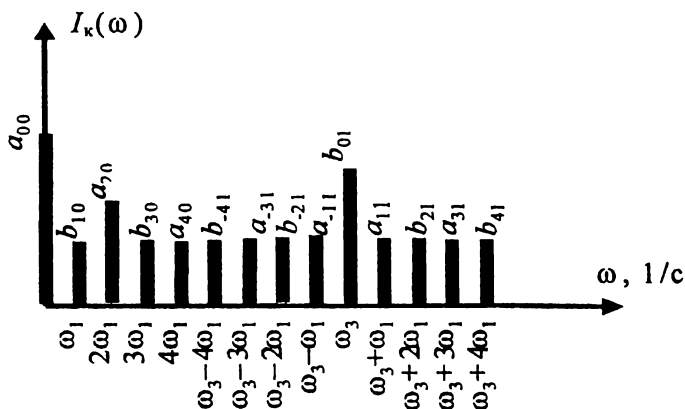


Рис. 2.3. Спектральный состав сигнала датчика при  $w_1 \neq 0$ ,  $w_3 \neq 0$ ,  $w_2 = 0$ ,  $a - \epsilon_0 = 0$ ,  $\delta - \epsilon_0 \neq 0$

Экспериментально установлена косинусоидальная зависимость тока вторичной эмиссии от угла между пучком электронов и нормалью к поверхности деталей [65]

$$\varphi_c(x) = \cos \alpha(x), \quad (2.27)$$

где  $\alpha(x)$  – угол к нормали поверхности.

Поэтому если элементы поверхности свариваемых деталей имеют углы к нормали, то коэффициент эмиссии рассчитывается с учетом указанных углов.

Одной из конструктивных особенностей свариваемых соединений является наличие технологических буртов. Такие бурты, также как и зазоры и разделки кромок, относятся к элементам неоднородности поверхности. Их действие связано с затенением части поверхности КВЭ для электронов, вылетающих из области затенения. На рис. 2.4 изображена схема расчета коэффициента при наличии бурта.

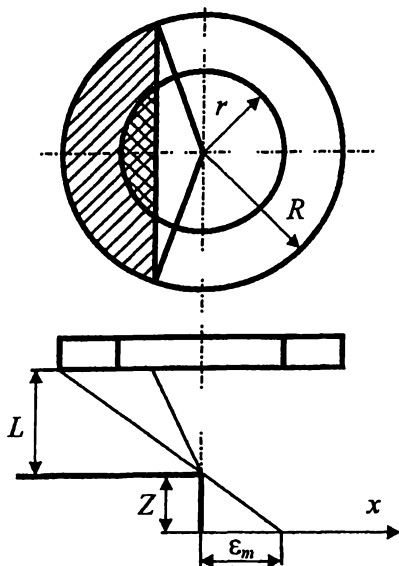


Рис. 2.4. Схема расчета коэффициента  $\varphi_c(x)$  при наличии бурта

В этом случае коэффициент рассчитывается по формуле

$$\varphi_c(x) = \begin{cases} 1; & 0 > x > \frac{ZR}{L}, \\ 1 - \frac{R^2 \left[ 2 \arccos \frac{xL}{RZ} - \sin \left( 2 \arccos \frac{xL}{RZ} \right) \right]}{2\pi(R^2 - r^2)}; & \frac{Zr}{L} < x < \frac{ZR}{L}, \\ 1 - \frac{R^2 \left[ \arccos \frac{\epsilon L}{RZ} - \sin \left( 2 \arccos \frac{xL}{RZ} \right) \right]}{2\pi(R^2 - r^2)} - \\ - \frac{r^2 \left[ 2 \arccos \frac{xL}{rZ} - \sin \left( 2 \arccos \frac{xL}{rZ} \right) \right]}{2\pi(R^2 - r^2)}; & 0 < x < \frac{Zr}{L}. \end{cases}$$

## 2.2. Статические характеристики датчика

Полученные математические модели позволяют исследовать характеристики вторично-эмиссионного датчика. Разработана программа для расчета характеристик датчика на ЭВМ [99].

Расчет статических характеристик датчика проводился по формуле (2.3), где верхняя и нижняя граница интегрирования соответственно принималась равной  $\epsilon + 3\sigma$  и  $\epsilon - 3\sigma$ . Для удобства интерпретации результатов вычислений введены безразмерные переменные

$$\bar{I}_k = \frac{I_k}{I_n}, \bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_0}{\sigma}, \bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\sigma}.$$

То есть расчеты проводились при токе пучка  $I_n = 1$  и  $\sigma = 1$ . Для определения абсолютных значений  $I_k$  и координат соответствующие значения  $\bar{I}_k$ ,  $\bar{\epsilon}$  и  $\bar{\Delta}$  необходимо умножить соответственно на  $I_n$  и  $\sigma$ . В выражении (2.3) величина  $\varphi(x)$  определялась по (2.26) в соответствии с конструкцией стыка.

На рис. 2.5 изображены зависимости тока вторичной эмиссии от положения пучка относительно стыка. Из этих характеристик видно, что ток вторичной эмиссии имеет минимум при совмещении электронного пучка с центром зазора в стыке. При увеличении отношения  $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\sigma}$  глубина модуляции вторично-эмиссионного тока увеличивается.

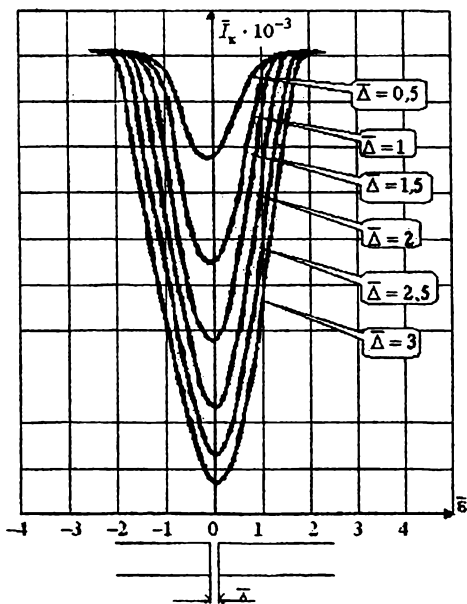


Рис. 2.5. Зависимость тока коллектора вторичных электронов от положения луча относительно стыка

На рис. 2.6 изображены зависимости тока КВЭ от положения пучка относительно стыка для стыкового соединения с разделкой кромок. Из рисунка видно, что разделка кромок увеличивает глубину модуляции сигнала датчика, причем чем больше угол  $\alpha$ , тем больше глубина модуляции.

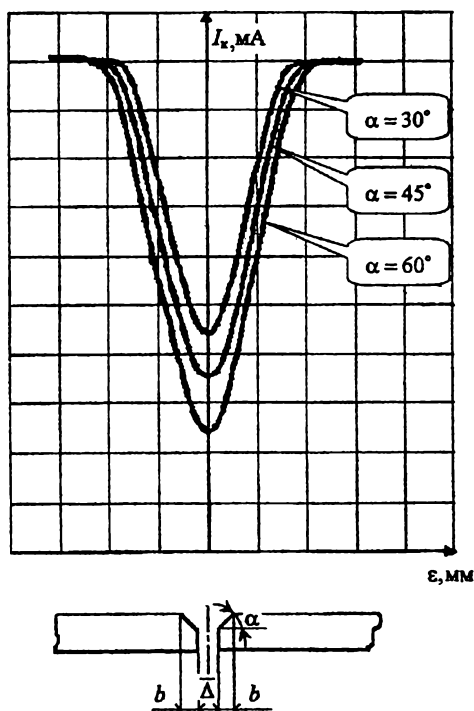


Рис. 2.6. Зависимость тока КВЭ от положения луча относительно стыка при  $\bar{\Delta} = 1$ ,  $b = 1$

На рис. 2.7 изображены характеристики КВЭ при несимметричной разделке кромок, наличие которой приводит к смещению характеристики от оси стыка и соответственно к методической погрешности положения стыка.

На рис. 2.8 изображены зависимости тока КВЭ от положения пучка относительно бурта. Как и в случае несимметричной разделки кромок, характеристики смещены в сторону заниженной поверхности.

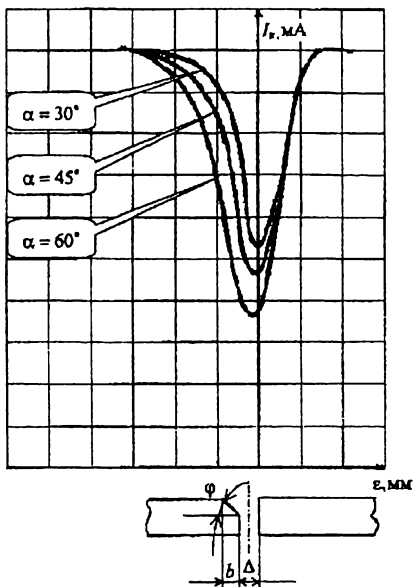


Рис. 2.7. Зависимость тока КВЭ от положения луча относительно стыка при  $\bar{\Delta} = 1$ ,  $\bar{b} = 2$

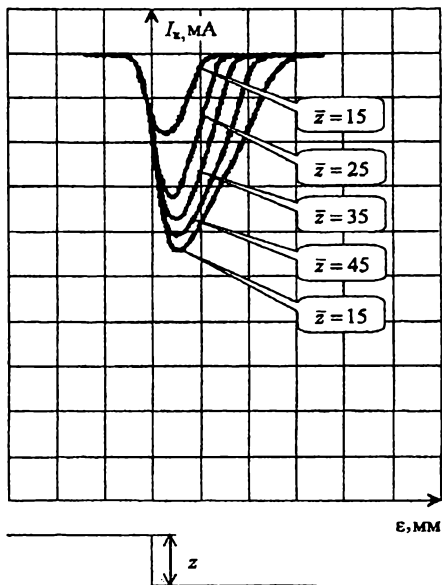


Рис. 2.8. Зависимость тока КВЭ от положения луча относительно бурта



Наиболее частой неточностью сборки изделия под сварку является превышение кромок. На рис. 2.9 показаны характеристики датчика вторичной эмиссии при наличии превышения кромок.

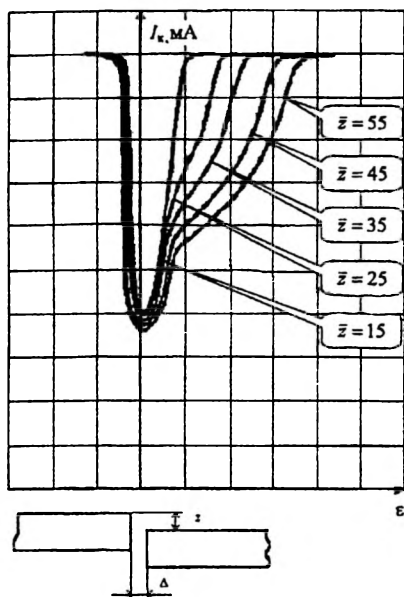


Рис. 2.9. Зависимость тока КВЭ от положения луча относительно стыка при  $\bar{\Delta} = 1$

Из рассматриваемых характеристик можно сделать следующие выводы:

- использование коллектора вторичных электронов в качестве датчика положения стыка обоснованно вследствие экстремальной характеристики в зоне стыка соединения;

- при наличии несимметричности стыка возникает смещение характеристик относительно стыка, что может привести к методической или случайной погрешности в зависимости от того, детерминированный или случайный характер имеет эта несимметрия.

Рассмотренная математическая модель может быть использована для анализа большинства известных в литературе вторично-эмиссионных систем для наведения электронного пучка на стык свариваемого изделия. Рассчитанные характеристики хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [123].

### 2.3. Спектральные характеристики датчика

При сканировании стыка электронным пучком в выходном сигнале КВЭ появляются составляющие с частотами, кратными частоте сканирования. Расчет соответствующих гармоник производился по формулам (2.15), (2.16) с учетом (2.9) и (2.26).

На рис. 2.10 и 2.11 изображены зависимости нечетных и четных гармоник от положения стыка. Из указанных характеристик видно, что амплитуды нечетных гармоник с частотами  $\omega_1$ ,  $3\omega_1$  и  $5\omega_1$  при малых отклонениях стыка пропорциональны этим отклонениям. Наиболее подходящей для контроля положения стыка является первая гармоника, имеющая наибольшую амплитуду и однозначность фазы в зависимости от направления отклонения. Более высшие гармоники (3-я и 5-я) такой однозначности фазы не имеют. Амплитуды четных гармоник  $a_m(\epsilon)$  максимальны при  $\epsilon = 0$  и характеризуют наличие (контрастность) стыка в зоне сканирования пучка. Наибольшую амплитуду и пригодность для целей контроля и управления процессом ЭЛС имеет вторая гармоника с частотой  $2\omega_1$ .

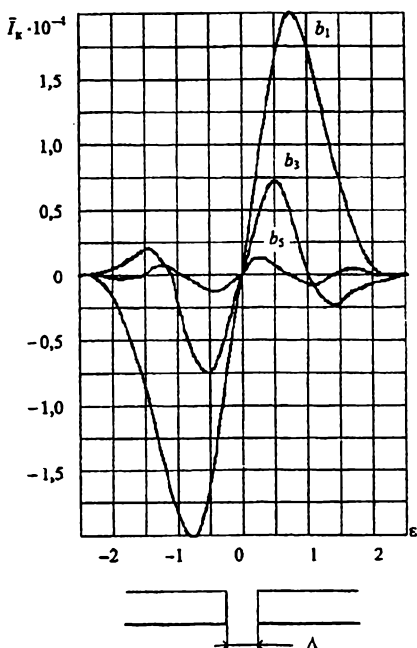


Рис. 2.10. Зависимость  $b_m(\epsilon)$  при  $\bar{\Delta} = 1$ ,  $\epsilon_m / \sigma = 1$

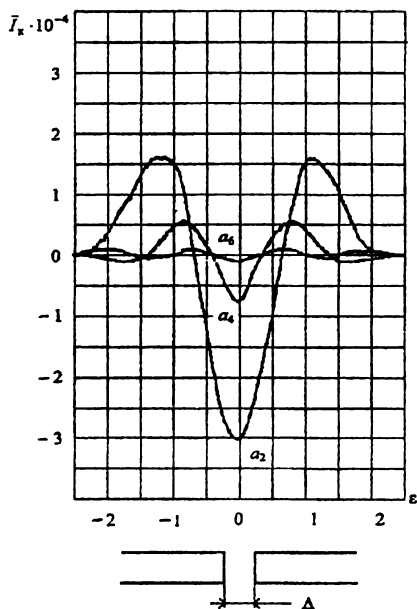


Рис. 2.11. Зависимость  $a_m(\epsilon)$  при  $\bar{\Delta} = 1$ ,  $\epsilon_m / \sigma = 1$

На рис. 2.12 показаны зависимости амплитуды второй гармоники от смещения стыка при различных зазорах в стыке. Из этих характеристик видно, что абсолютное значение второй гармоники возрастает при увеличении отношения  $\Delta/\sigma$ . Аналогичное увеличение претерпевает крутизна характеристики первой гармоники при смещении стыка. Оказывается, что амплитуда второй гармоники при  $\epsilon = 0$  характеризует чувствительность датчика положения стыка. Эта величина может быть использована для контроля степени фокусировки электронного пучка, изменения величины зазора в стыке и как характеристика достоверности наведения электронного пучка на стык. Если амплитуда второй гармоники равна нулю, то стык под сканирующим пучком отсутствует.

На рис. 2.13 изображены зависимости нечетных гармоник от положения пучка электронов относительно бурта. Как и при рассмотрении статических характеристик, гармонические составляющие смещаются от бурта на заниженную поверхность, что приводит к методической погрешности в позиционировании электронного пучка относительно бурта.

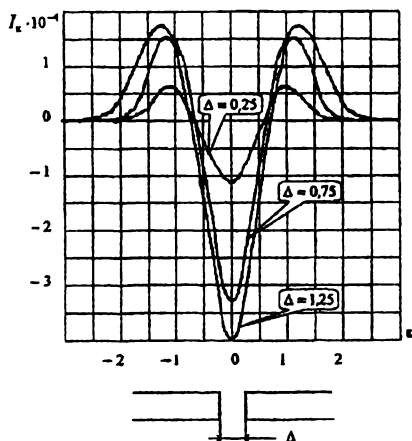


Рис. 2.12. Зависимость  $a_2(\epsilon)$ : 1 -  $\Delta = 0,25$ ; 2 -  $\Delta = 0,75$ ; 3 -  $1,25$

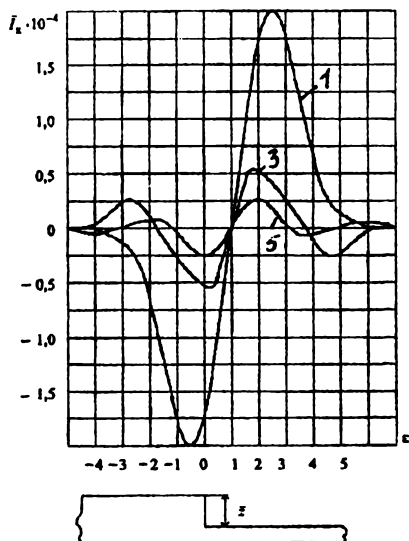


Рис. 2.13. Зависимость  $b_m(\epsilon)$  при  $\bar{z} = 20$ ,  $\bar{\epsilon}_m = 1$

Для управления процессом ЭЛС необходимо иметь информацию как о положении стыка свариваемого изделия, так и о положении фокуса относительно поверхности изделия. Положение острой фокусировки соответствует максимальному значению амплитуды второй гармоники. То есть если использовать вторую гармонику для контроля и слежения

за положением фокуса, то структура системы управления представляет собой экстремальный регулятор. Для того чтобы получить сигнал, пропорциональный отклонению тока фокусирующей линзы от положения острой фокусировки, вводится гармоническая составляющая в ток фокусирующей линзы с частотой  $\omega_2$ . При этом луч сканируется поперек стыка с частотой  $\omega_1$ . Положение фокальной плоскости может быть определено по гармонической составляющей  $b_{mn}$  с боковыми частотами  $2\omega_1 \pm \omega_2$  (рис. 2.14).

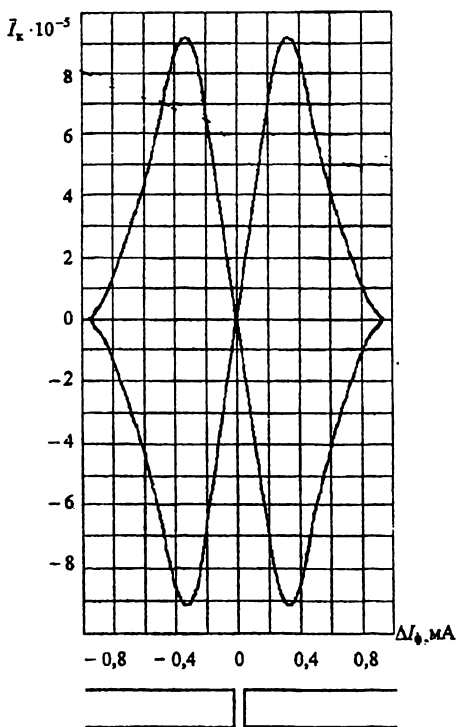


Рис. 2.14. Зависимость  $b_{mn}(\Delta I_\phi)$  при  $\bar{\Delta} = 1$ ,  $\bar{\varepsilon} = 0$ ,  $\sigma_m = 0,1$

Любая из боковых составляющих однозначно определяет положение острой фокусировки на поверхности свариваемого изделия. Следует заметить, что в соответствии с изложенным методом удастся определить ток фокусирующей линзы, соответствующей острому фокусу, но при этом значение эффективного диаметра пучка или  $\sigma$  не контролируется.

## 2.4. Построение измерительных устройств по методу синхронного детектирования

Известные в настоящее время методы приема сигналов могут быть сведены к интегральной операции вида [162]

$$I = \int_0^T F(t)\varphi(t)dt, \quad (2.28)$$

где  $F(t) = f(t) + \eta(t)$  – сумма сигнала и помехи;  $\varphi(t)$  – весовая функция, определяющая способ приема, так, например, имеем:

$\varphi(t) = 1$  – метод накопления;

$\varphi(t) = F(t - \tau)$  – автокорреляционный прием;

$\varphi(t) = f_0(t)$  – когерентный прием;

$\varphi(t) = g(T - t)$ , где  $g(t)$  – импульсная функция фильтра – фильтрация.

Методы, описываемые формулой (2.28), дают результаты, близкие к предельному соотношению сигнал/помеха [162]. Это означает, что вопрос о выборе метода приема перемещается в область технических или технико-экономических соображений. С технической стороны требованиям относительной простоты аппаратных средств отвечают методы фильтрации и когерентного приема. Применение этих методов предполагает наличие в сигнале КВЭ спектральных составляющих, несущих информацию о положении стыка и фокальной плоскости относительно поверхности свариваемых деталей. Синхронное детектирование относится к способам когерентного приема. В этом случае в качестве весовой функции используется гармоническая или переключающая функция с частотой, равной или кратной частоте соответствующих сканирований. Для того чтобы получить информационный сигнал в виде напряжения постоянного тока, пропорциональный отклонению стыка, необходимо сигнал с датчика вторичных электронов пропустить через избирательный фильтр и демодулировать.

Структурная схема измерительного устройства для контроля положения стыка, работающего по методу синхронного детектирования, изображена на рис. 2.15.

С помощью генератора  $\Gamma$  осуществляется формирование двух периодических составляющих: поискового синусоидального и опорного прямоугольного сигнала с частотой  $\omega_1$ . Первая составляющая через сумматор и усилитель мощности поступает в отклоняющую систему электронно-лучевой пушки и формирует сигнал сканирования стыка пучком с частотой  $\omega_1$  и амплитудой  $\epsilon_m$ . Вторая составляющая поступает

на опорный вход демодулятора. Между демодулятором и коллектором вторичных электронов включен избирательный усилитель, настроенный в резонанс на частоте  $\omega_1$ . Полоса пропускания избирательного усилителя выбирается такой, чтобы все остальные составляющие кратные частоте сканирования, подавлялись с коэффициентом ослабления не менее 40 дБ. Напряжение на выходе демодулятора  $U_{\text{вых}}$  характеризует отклонение стыка свариваемого изделия в соответствии с зависимостью, изображенной на рис. 2.10. Это напряжение является управляющим сигналом в системе слежения по стыку. Вырабатываемое системой слежения напряжение обратной связи  $U_{\text{ос}}$  является напряжением постоянного тока и используется для коррекции положения электронного пучка относительно стыка свариваемого изделия.

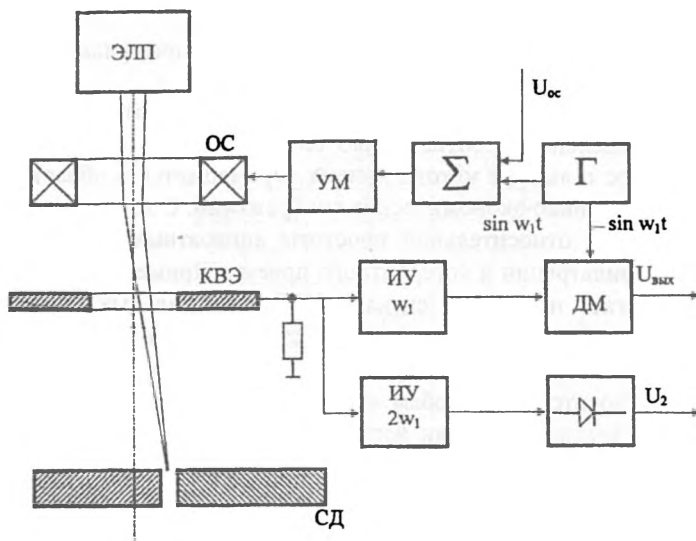


Рис. 2.15. Структурная схема измерительного устройства, работающего по методу синхронного детектирования: ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ОС – отклоняющая система; КВЭ – коллектор вторичных электронов; ИУ  $\omega_1$  – избирательный усилитель с частотой настройки  $\omega_1$ ; ИУ  $2\omega_1$  – избирательный усилитель с частотой настройки  $2\omega_1$ ; ДМ – демодулятор; Г – генератор; УМ – усилитель мощности; СД – свариваемые детали;  $\Sigma$  – сумматор;  $\text{—}|$  – выпрямитель

В измерительном устройстве также вырабатывается сигнал второй гармоники  $U_2$ , который используется для контроля фокусировки электронного пучка и является величиной, характеризующей чувствительность датчика положения стыка. Наличие необходимого уровня

сигнала второй гармоники указывает на достоверный захват стыка следящей системой. Поэтому эта величина может служить мерой надежности функционирования системы.

На рис. 2.16, а, б изображены функциональные схемы измерительного устройства.

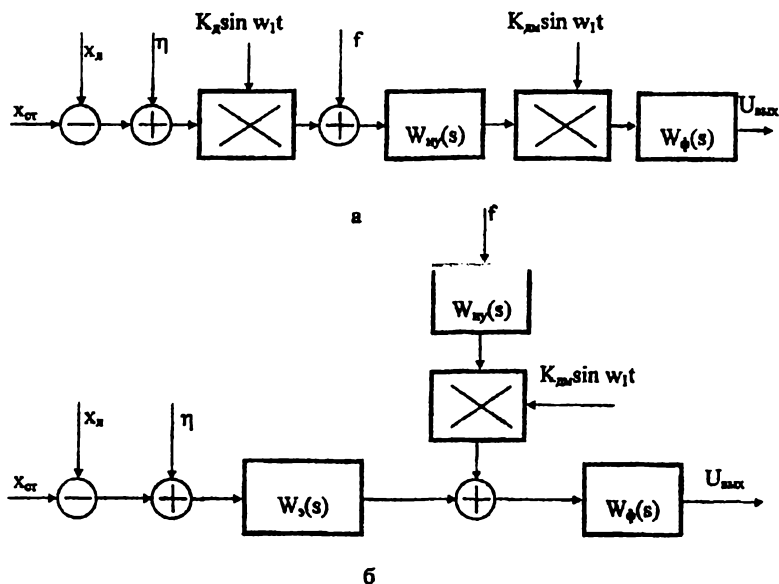


Рис. 2.16. Функциональные схемы измерительного устройства

Функциональная схема рис. 2.16, а представляет собой систему с амплитудной модуляцией на несущей переменного тока. Собственно вторично-эмиссионный датчик представляет собой элемент сравнения двух координат: стыка  $X_{ст}$  и луча  $X_n$  – и модулятор, представляющий собой устройство умножения. Помеха  $\eta$  действует на входе вторично-эмиссионного датчика и имеет ту же природу, что и координата стыка, и вследствие этого модулируется так же, как и отклонение стыка. К таким помехам относятся различные царапины, неровности поверхности свариваемых деталей, непостоянства химического состава материала и загрязнения, приводящие к изменению коэффициента вторичной эмиссии. Помеха  $f$  на выходе вторично-эмиссионного датчика представляет собой различные наводки, а также компоненты сигнала вторично-эмиссионного датчика, имеющие частоты, отличные от  $\omega_1$ . На выходе вторично-эмиссионного датчика подключен избирательный



усилитель с передаточной функцией  $W_{н.у}(s)$ . Демодулятор математически представляет собой устройство умножения на функцию  $K_{д.м} \sin \omega_1 t$ . На выходе демодулятора подключен фильтр нижних частот с передаточной функцией  $W_{\phi}(s)$ . В соответствии со структурной схемой измерительное устройство представляет собой систему на несущей переменного тока. Для того чтобы использовать аппарат преобразования Лапласа и частотные характеристики, определяют передаточную функцию по огибающей элемента динамической системы, размещенного между модулятором и демодулятором [70; 81].

На рис. 2.16, б изображена функциональная схема измерительного устройства на несущей переменного тока. Здесь  $W_3(s)$  – передаточная функция на несущей переменного тока последовательного соединения модулятора, избирательного усилителя и демодулятора, определяемая по формуле

$$W_3(s) = \frac{K_d K_{д.м}}{2} \operatorname{Re}_j \{ W_{н.у}(s + j\omega_1) \} \quad (2.29)$$

где  $\operatorname{Re}_j$  обозначает реальную часть выражения, заключенного в фигурные скобки, относительно оператора  $j$ . Выражение (2.29) является основным соотношением при анализе систем управления на несущей. Применительно к нашему случаю мы имеем в качестве четырехполюсника, размещенного между модулятором и демодулятором, избирательный усилитель, настроенный в резонанс на частоте  $\omega_1$ . Предположим, что число избирательных каскадов равно  $n$ . Тогда передаточная функция избирательного усилителя имеет вид

$$W_{н.у}(s) = \prod_{i=1}^n \frac{K_i s}{T_i^2 s^2 + 2\varepsilon_i T_i s + 1} \quad (2.30)$$

Подставляя выражение (2.30) в (2.29) и проводя некоторые упрощения, передаточная функция по огибающей может быть представлена в виде [129]

$$W_3(s) = \frac{K_d K_{д.м} K_{н.у}}{2 \prod_{i=1}^n T_i s + 1} \quad (2.31)$$

где  $K_{н.у}$  – общий коэффициент усиления избирательного усилителя на резонансной частоте  $\omega_1$ ;

$$T_i = \frac{2Q_i}{\omega_1},$$

где  $Q_i$  – добротность  $i$ -го резонансного каскада усилителя;

$$Q_i = \frac{\omega_1}{\Delta\omega_i},$$

где  $\Delta\omega_i = 2\pi\Delta f_i$ ;  $\Delta f_i$  – полоса пропускания  $i$ -го каскада на уровне ослабления, равном 0,7.

Из выражения (2.31) видно, что эквивалентная передаточная функция по огибающей представляет собой последовательное соединение  $i$  апериодических звеньев по числу резонансных каскадов, причем постоянная времени звеньев определяется добротностью соответствующих избирательных каскадов. Зная эквивалентную передаточную функцию  $W_0(s)$ , в соответствии с функциональной схемой измерительного устройства (рис. 2.16, б) анализ и синтез системы слежения может быть произведен известными методами теории автоматического управления [116].

### Глава 3

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕНТГЕНОВСКОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ СТЫКА

В результате взаимодействия пучка электронов с обрабатываемым материалом возникает тормозное рентгеновское излучение. Мощность (интенсивность) рентгеновского излучения определяется выражением [144; 160]

$$P = \int_s J ds = k_0 I Z U_0^2,$$

где  $s$  – поверхность, через которую проходит поток;  $k_0$  – коэффициент пропорциональности;  $U_0$  – ускоряющее напряжение;  $I$  – ток электронного пучка;  $Z$  – атомный номер обрабатываемого материала.

По экспериментальным данным при ускоряющих напряжениях до 200 кВ коэффициент  $k_0 = (0,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-9} \text{В}^{-1}$ . КПД преобразования энергии пучка электронов в рентгеновское излучение  $P$  определяется выражением

$$\eta = \frac{P}{U_0 I} = k_0 Z U_0.$$

Отсюда следует, что выход тормозного излучения растет с увеличением атомного номера материала мишени и ускоряющего напряжения. Численные значения КПД для ряда ускоряющих напряжений приведены в табл. 3.1 [66].

Таблица

**КПД возбуждения тормозного излучения**

Ускоряющее напряжение $U_0$ , кВ	КПД $\eta$ , %	
	Расчетный	Экспериментальный
43	0,33	0,46
100	0,74	1,11
150	1,11	1,64
200	1,48	2,2
1 000	7,5	9,0
10 000	–	60

Из таблицы видно, что КПД возбуждения тормозного излучения при ускоряющих напряжениях до 150 кВ, обычно применяемых электронно-лучевой сварке и обработке, не превышает 2 %. Практически вся мощность электронного пучка преобразуется в тепло.

В диапазоне ускоряющих напряжений до 200 кВ можно записать выражение (3.1) в виде, учитывая, что  $k_0 = 1 \cdot 10^{-9} \text{В}^{-1}$ :

$$P = \int_s J ds = k_0 I Z U_0^2 = 2 \cdot 10^{-9} I Z \frac{U_0^2}{2} = 1 \cdot 10^{-9} \int_0^{U_0} U dU. \quad (3.3)$$

Анализ спектрального состава тормозного излучения показал, что оно имеет непрерывный спектр в диапазоне частот  $\nu$  от 0 до  $\nu_0$ , где граничная частота спектра прямо пропорциональна ускоряющему напряжению  $U_0$  [144]:

$$\nu_0 = 2,42 \cdot 10^{14} U_0. \quad (3.4)$$

Интенсивность тормозного излучения представляет совокупность интенсивностей всех составляющих спектра:

$$J = \int_{\lambda_{\min}}^{\infty} J_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\nu_0} J_{\nu} d\nu, \quad (3.5)$$

где  $\lambda$  – длина волны, связанная с частотой  $\nu$  соотношением  $\lambda = \frac{C}{\nu}$ , где  $C$  – скорость света.

Зависимость минимальной длины волны от ускоряющего напряжения определяется выражением

$$\lambda_{\min} = \frac{12,35}{U_0}$$

где  $\lambda$  выражается в ангстремах,  $U_0$  – в киловаттах.

Вентцель теоретически получил следующую формулу, дающую зависимость между плотностью интенсивности лучей торможения в соответствии с частотой:

$$J_{\nu} = CZ^{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{\nu_0 - \nu}} - \frac{1}{\sqrt{\nu_0}} \right)^{-\frac{2}{3}} (1 + Q), \quad (3.6)$$

где  $J_{\nu}$  – плотность интенсивности излучения частоты  $\nu$ ;

$$C = \frac{16}{3\sqrt{3}} \frac{\pi^2 e^6}{mhc^3} = \text{const};$$

$$Q = 0,218Z\sqrt{R} \left( \frac{1}{\sqrt{\nu_0 - \nu}} - \frac{1}{\nu_0} \right)^{-\frac{2}{3}}$$

$R$  – постоянная Ридберга,  $R = \frac{2\pi mc}{ch^3} = 109737 \text{ см}^{-1}$ .

Распределение интенсивности, вычисленное по этой формуле хорошо согласуется с экспериментами.

В работе Крамуса найдена более простая, но менее точная формула, дающая зависимость  $J_\nu$  от  $\nu$ :

$$J_\nu = n \frac{8\pi}{3\sqrt{3}b} \frac{e^2 h}{c^3 m} Z(\nu_0 - \nu), \quad (3.7)$$

где  $b$  – число, приблизительно равное 6;  $n$  – число электронов, падающих в 1 с.

После подстановки числовых данных эта формула принимает вид

$$J_\nu = n \cdot 4,95 \cdot 10^{-50} Z(\nu_0 - \nu),$$

или

$$J_\nu = 0,341 \cdot 10^{-37} IZ(\nu_0 - \nu). \quad (3.8)$$

Используя формулы (3.3) и (3.8), можно рассчитать количество квантов рентгеновского излучения в единицу времени, имеющих определенную длину волны. Энергия одного кванта

$$eU = h\nu, \quad U_0 \geq U \geq 0, \quad \nu_0 \geq \nu \geq 0,$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  К – заряд электрона;  $h = 6,6254 \cdot 10^{-27}$  эрг · с – постоянная Планка.

Для определения интенсивности излучения в области рентгеновского датчика необходимо узнать долю рентгеновского излучения, прошедшего через площадь кристалла датчика. Интенсивность рентгеновского излучения, проходящего через кристалл датчика, определяется выражением

$$J_d = J \frac{\alpha\beta}{4\pi^2} = K_1 J, \quad (3.9)$$

где  $J$  – интенсивность рентгеновского излучения пучка электронов;  $\alpha$  и  $\beta$  – телесные углы на кристалл датчика из точки взаимодействия пучка с обрабатываемой поверхностью.

Выражение (3.9) может быть распространено и на спектральную плотность интенсивности  $J_\nu$ , описываемую формулами (3.6), (3.8). При выводе формулы (3.9) предполагалось, что пространственное распределение интенсивности рентгеновского излучения является круговым, что согласуется с экспериментальными исследованиями [192].

На рис. 3.1 показана диаграмма пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения при различных углах падения электронного пучка [192].

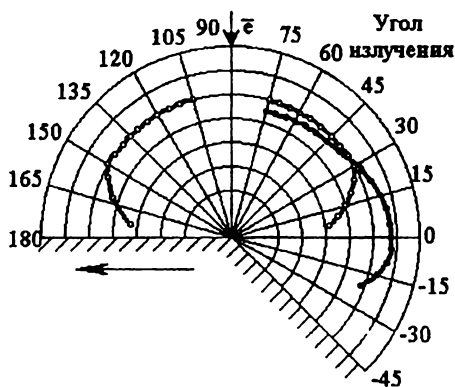


Рис. 3.1. Диаграмма пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения: угол падения пучка:  $\circ$  –  $90^\circ$ ,  $\bullet$  –  $45^\circ$

Из этих диаграмм видно, что при угле падения пучка на поверхность детали, равном  $90^\circ$ , диаграмма распределения имеет характер окружности. Отклонение диаграммы от круговой может быть объяснено ослаблением излучения материалом мишени.

Для определения влияния на интенсивность рентгеновского излучения угла падения пучка относительно поверхности обрабатываемой детали авторами настоящей работы были проведены экспериментальные исследования. Схема эксперимента изображена на рис. 3.2.

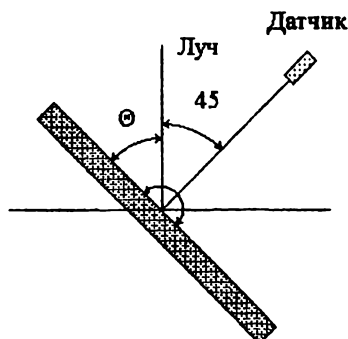


Рис. 3.2. Схема эксперимента по определению зависимости интенсивности рентгеновского излучения от угла падения луча

Обрабатываемая деталь с полированной поверхностью установлена на механизме поворота, ось вращения которого совпадает с точкой падения пучка на обрабатываемую поверхность. Угол поворота контролировался датчиком угла. Рентгеновский датчик устанавливался под углом  $45^\circ$  к падению пучка.

На рис. 3.3 изображена зависимость относительно изменения интенсивности рентгеновского излучения от угла падения пучка. Из этой зависимости видно, что существенное снижение интенсивности рентгеновского излучения начинает сказываться при углах падения пучка относительно поверхности обрабатываемой детали меньше  $15^\circ$ . Эта зависимость интенсивности от угла падения пучка используется при составлении математической модели датчика стыка.

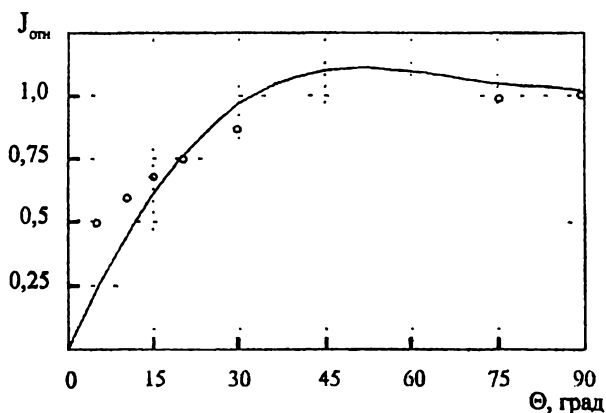


Рис. 3.3. Зависимость относительного изменения интенсивности рентгеновского излучения от угла падения электронов на обрабатываемую поверхность:  $\circ$  – экспериментальные данные; — аппроксимация формулой  $2,762 \sin\Theta - 1,762 \sin^2\Theta$

### 3.1. Математическая модель рентгеновского датчика положения стыка

Учитывая, что плотность тока пучка распределена на поверхности обрабатываемой детали неравномерно и на поверхности детали имеют место неоднородности типа стыка соединения, приводящие к изменению интенсивности рентгеновского излучения, с учетом выражений (3.1), (3.9) можно записать интенсивность рентгеновского излучения, попадающего на рентгеновский датчик, в следующем виде [105]:

$$J_{\text{д}} = K_0 K_1 Z I_{\text{п}} U_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_2(x, y) j_{\text{п}}(x, y) dx dy,$$

где  $K_0$  – коэффициент пропорциональности;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий позицию датчика ( $\varphi$ ,  $\alpha$ ,  $R$ ) в сферических координатах;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий неоднородность материала свариваемого изделия (наличие стыка);  $j_{\text{п}}$  – нормированная плотность распределения тока пучка на поверхности детали в координатах  $x$  и  $y$ .

Разместим начало координат в середину стыка и ориентируем ось  $OY$  параллельно стыку деталей. Учитывая, что плотность распределения тока пучка можно представить нормальным законом, запишем:

$$J_{\text{д}} = \frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I_{\text{п}}}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_2(x) e^{-\frac{(x-\varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(y-\varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}} dy, \quad (3.10)$$

где  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  – координаты математического ожидания электронов по осям  $X$  и  $Y$ ;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – среднее квадратическое отклонение электронов от центра пучка по осям  $X$  и  $Y$ .

Для того чтобы на точность определения положения стыка в значительной степени не сказывалось превышение кромок свариваемых деталей, рентгеновский датчик необходимо устанавливать симметрично стыку. Схема размещения рентгеновского датчика изображена на рис. 3.4. В общем случае датчик установлен в плоскости стыка под углом  $\varphi$  к поверхности свариваемых деталей.

В этом случае на участках

$$\left. \begin{aligned} -\infty \leq x \leq -0,5hs, \\ 0,5hs \leq x \leq \infty, \end{aligned} \right\}$$

можно принять  $K_2 = 1$ .

На участке  $-0,5hs < x < 0,5hs$  значение коэффициента  $K_2$  зависит от угла  $\alpha$ :

$$K_2(\alpha) = \begin{cases} K_s & \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha'_1, \\ 1 & \alpha'_1 < \alpha < \alpha'_2, \\ K_s & \alpha'_2 \leq \alpha \leq \alpha_2, \end{cases} \quad (3.11)$$

где  $K_s = \exp(-\mu L / \sin\varphi)$  – коэффициент ослабления рентгеновского излучения материалом свариваемого изделия толщиной  $L / \sin\varphi$ ;  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления, зависящий от материала и ускоряющего напряжения.

На участке  $-0,5hs < x < 0,5hs$  можно записать:





$$K_{s1} = K_s + \frac{hsR}{L \cdot L_d} (1 - K_s) \sin \varphi.$$

Подставляя полученные значения  $K_2(x)$  в формулу (3.10), получим:

$$J_d = \frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{-0,5hs} \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] dx + \right. \\ \left. + K_{s1} \int_{-0,5hs}^{0,5hs} \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] dx + \right. \\ \left. + \int_{0,5hs}^{\infty} \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] dx \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2} \right] dy. \quad (3.13)$$

Упрощая выражение, получим:

$$J_d = K_0 K_1 Z U_0^2 I \left[ 1 - \frac{1 - K_{s1}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-0,5hs}^{0,5hs} \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] dx \right]. \quad (3.14)$$

Интеграл в выражении (3.14) можно решить по приближенной формуле. В этом случае

$$J_d \approx K_0 K_1 Z U_0^2 I \left[ 1 - \frac{1 - K_{s1}}{\sigma \sqrt{2\pi}} hs \cdot \exp \left( -\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2} \right) \right]. \quad (3.15)$$

Выражения (3.13) и (3.14) определяют статическую характеристику рентгеновского датчика стыка. На рис. 3.5 показана зависимость нормированной интенсивности рентгеновского излучения от места положения пучка относительно стыка. Расчеты проводились по формуле (3.14) при величине зазора  $hs = 3$  мм для различных значений  $\sigma/hs$ , ширина датчика  $L_d = 50$  мм, расстояние от датчика до места сварки  $R = 200$  мм.

Определим коэффициент глубины модуляции  $K_m$  сигнала от стыка (рис. 3.6) как отношение

$$K_m = \frac{A_s}{A},$$

где  $A_s$  – амплитуда сигнала от стыка;  $A$  – амплитуда сигнала датчика при отсутствии стыка.

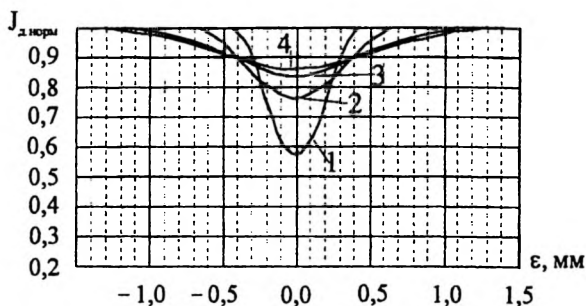


Рис. 3.5. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения  $J_{д.норм}$  от  $\epsilon$  при  $hs = 0,3$  мм; 1 —  $\sigma / hs = 0,5$ ; 2 — 1; 3 — 1,5; 4 — 2

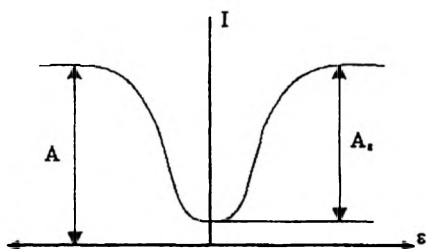


Рис. 3.6. Определение коэффициента глубины модуляции

Коэффициент глубины модуляции для рентгеновского датчика определяется выражением

$$K_m = \frac{1 - K_{sl}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-0,5hs}^{0,5hs} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] dx. \quad (3.16)$$

Для оценочных расчетов при  $\sigma / hs > 1$  можно пользоваться формулой

$$K_m = \frac{1 - K_{sl}}{\sigma \sqrt{2\pi}} hs.$$

На рис. 3.7 изображена зависимость коэффициента модуляции от соотношения  $\sigma / hs$ . Расчеты проводились по формуле (3.16). Из характеристик видно, что глубина модуляции падает при увеличении соотношения  $\sigma / hs$ . Это означает, что сигнал от стыка в этих случаях бывает мал и трудно добиться требуемой помехозащищенности измерительного устройства. Для повышения глубины модуляции можно увеличить величину зазора в стыке  $hs$ , но такой прием на практике

применяется редко, так как это приводит к такому дефекту, как занижение верхней поверхности шва. Поэтому был разработан специальный коллимированный рентгеновский датчик стыка и специальный метод измерения, позволяющий увеличить глубину модуляции без изменения величины зазора в стыке.

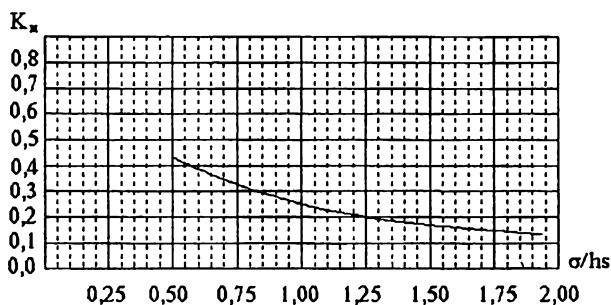


Рис. 3.7. Зависимость коэффициента глубины модуляции  $K_m$  от отношения  $\sigma / h_s$

### 3.2. Математическая модель коллимированного рентгеновского датчика положения стыка

Рентгеновский датчик содержит коллиматор – щелевую бленду из свинца, которая ограничивает зону обзора датчика. Коллимированный датчик ориентируется таким образом, чтобы проекция коллимационного отверстия, представляющего собой полосу, ширина которой  $h_k$  меньше диаметра пучка  $d_n$ , пересекала стык с зазором  $h_s$  под углом  $\beta$  (рис. 3.8 и 3.9). Пересечение стыка пучком производится вдоль проекции коллимированного отверстия на оси  $X$ . Зона обзора коллимированного датчика представлена плоскостью  $absd$ .

Интенсивность рентгеновского излучения на коллимированном датчике можно представить в виде

$$J_d = \frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{x_1} \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] dx \int_{-0,5h_k}^{0,5h_k} \exp \left[ -\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2} \right] dy + \right. \\ \left. + \int_{x_4}^{\infty} \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] dx \int_{-0,5h_k}^{0,5h_k} \exp \left[ -\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2} \right] dy \right\} + J_1 + J_2 + J_3, \quad (3.17)$$

где  $J_1$  – интенсивность рентгеновского излучения с поверхности детали 1

на участке от  $x_1$  до  $x_2$ ;  $J_2$  – интенсивность рентгеновского излучения с поверхности детали 2 на участке от  $x_3$  до  $x_4$ ;  $J_3$  – интенсивность рентгеновского излучения из зазора в стыке 3.

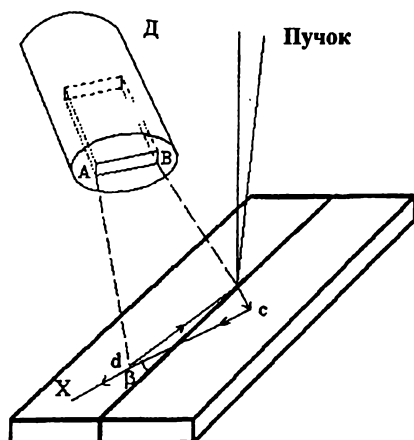


Рис. 3.8. Схема ориентации коллимированного рентгеновского датчика

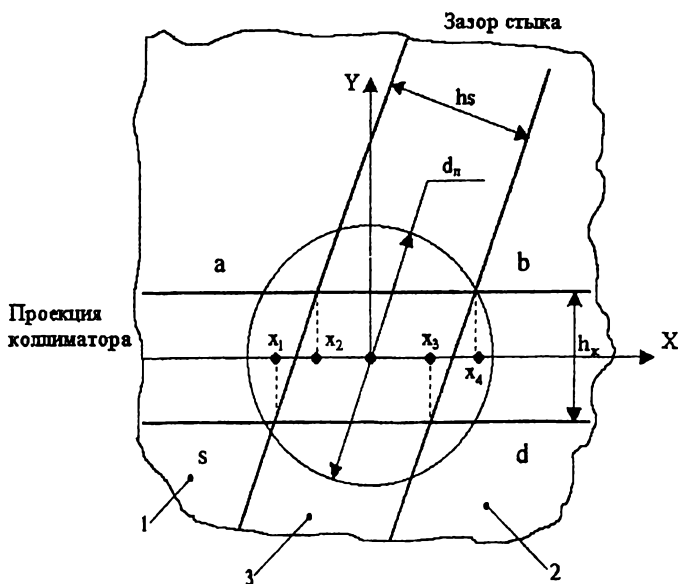


Рис. 3.9. Схема формирования сигнала коллимированного РДС

Учитывая, что  $d_n = 2\sigma$  и  $h_k < 2\sigma$ ,  $\varepsilon_y = 0$ , можно решить приближенно интеграл в выражении (3.17):

$$\int_{-0,5h_k}^{0,5h_k} \exp\left[-\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] dy \approx h_k.$$

Определим значения составляющих в выражении (3.17):

$$J_1 = \frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I}{\sigma^2 2\pi} \int_{x_1}^{x_2} \left(0,5h_k - x \operatorname{tg} \beta - \frac{hs}{2 \cos \beta}\right) \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right] dx,$$

$$J_2 = \frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I}{\sigma^2 2\pi} \int_{x_3}^{x_4} \left(0,5h_k + x \operatorname{tg} \beta - \frac{hs}{2 \cos \beta}\right) \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right] dx,$$

$$J_3 = K_s \left\{ \frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I}{\sigma^2 2\pi} \int_{x_1}^{x_4} \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right] dx - J_1 - J_2 \right\}.$$

С учетом этих составляющих выражение (3.17) запишется в виде

$$J_n = \frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I}{\sigma \sqrt{2\pi}} \left\{ 1 - \frac{1 - K_s}{\sigma \sqrt{2\pi}} \left[ \int_{x_1}^{x_4} \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right] dx - \int_{x_1}^{x_2} \left(0,5 - \frac{x \cdot \operatorname{tg} \beta}{h_k} - \frac{hs}{2h_k \cos \beta}\right) \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right] dx - \int_{x_3}^{x_4} \left(0,5 + \frac{x \cdot \operatorname{tg} \beta}{h_k} - \frac{hs}{2h_k \cos \beta}\right) \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right] dx \right] \right\}, \quad (3.18)$$

где пределы интегрирования равны:

$$x_1 = -\frac{h_k \cos \beta + hs}{2 \sin \beta}, \quad x_3 = -\frac{h_k \cos \beta + hs}{2 \sin \beta},$$

$$x_2 = \frac{h_k \cos \beta - hs}{2 \sin \beta}, \quad x_4 = \frac{h_k \cos \beta + hs}{2 \sin \beta}. \quad (3.19)$$

На рис. 3.10...3.12 показаны зависимости нормированной интенсивности от места положения пучка относительно стыка для различных значений  $\sigma / hs$  и углов  $\beta = 10, 45, 75, 90^\circ$ .

Расчеты выполнялись по формулам (3.18) и (3.19). Нормирование производилось делением полученных величин на коэффициент

$$\frac{K_0 K_1 Z U_0^2 I}{\sigma \sqrt{2\pi}}$$

Из графиков видно, что при уменьшении угла  $\beta$  глубина модуляции сигнала увеличивается.

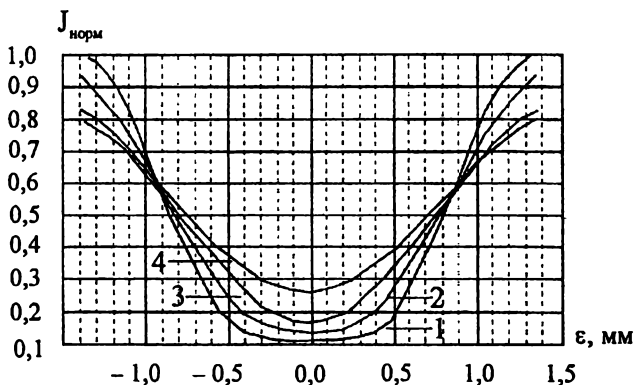


Рис. 3.10. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от места положения пучка на стыке при  $h_k = 0,1$  мм,  $h_s = 0,3$  мм:  
1 —  $\sigma / h_s = 0,5$ ; 2 — 1; 3 — 1,5; 4 — 2;  $\beta = 10^\circ$

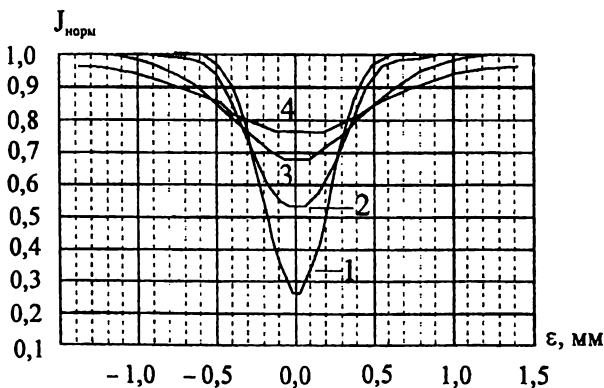


Рис. 3.11. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от места положения пучка на стыке с коллиматором шириной  $h_k = 0,1$  мм,  $h_s = 0,3$  мм:  
1 —  $\sigma / h_s = 0,5$ ; 2 — 1; 3 — 1,5; 4 — 2;  $\beta = 45^\circ$

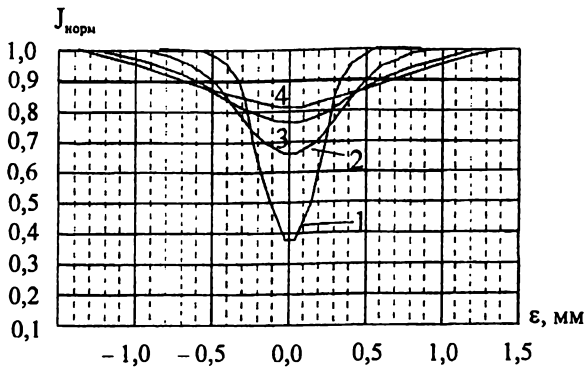


Рис. 3.12. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от места положения пучка на стыке с коллиматором шириной  $h_k = 0,1$  мм при  $h_s = 0,3$  мм: 1 –  $\sigma / h_s = 0,5$ ; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2;  $\beta = 75^\circ$

Произведем расчет коэффициента глубины модуляции сигнала от стыка:

$$K_M = \frac{1 - K_s}{\sigma \sqrt{2\pi}} \left\{ \int_{x_1}^{x_4} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] dx - \int_{x_1}^{x_2} \left(0,5 - \frac{x \operatorname{tg} \beta}{h_k} - \frac{h_s}{2h_k \cos \beta}\right) \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] dx - \int_{x_3}^{x_4} \left(0,5 + \frac{x \operatorname{tg} \beta}{h_k} - \frac{h_s}{2h_k \cos \beta}\right) \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] dx \right\}.$$

На рис. 3.13 изображена зависимость коэффициентов глубины модуляции от угла наклона коллиматора и оси стыка  $\beta$  для различных значений  $\sigma / h_s$ . Из этих характеристик видно, что при угле наклона  $\beta = 10^\circ$  коэффициент глубины модуляции высок для всех отношений  $\sigma / h_s$ .

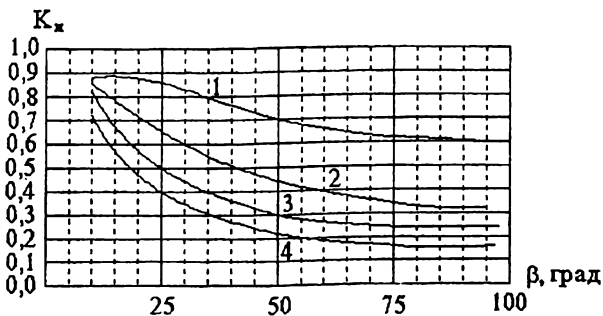


Рис. 3.13. Зависимость коэффициента глубины модуляции сигнала  $K_M$  от  $\beta$  при  $h_k = 0,1$  мм,  $h_s = 0,3$ : 1 –  $\sigma / h_s = 0,5$ ; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2



## Глава 4

### АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ СТЫКА

Высокие требования по точности и надежности совмещения электронного пучка со стыком свариваемого изделия могут быть достигнуты при соответствующей помехозащищенности измерительных устройств. В настоящее время разработано много различных систем слежения за стыком, однако большинство из них не находят применения из-за низкой надежности. Следует отметить, что надежность системы слежения в основном зависит от помехоустойчивости ее измерительного устройства. Часто из-за действия помех возникают недопустимые ошибки (сбои), приводящие к потере работоспособности следящей системы. Оценка помехозащищенности измерительного устройства является комплексной задачей. При этом необходимо учитывать тип датчика, форму сигнала от стыка, способ выделения на фоне помех.

Свойство рентгеновских лучей не изменять своего направления в условиях действия электромагнитных помех, свободное прохождение через пары металла, размещение датчика в экране и его гальваническая развязка от электронно-лучевой установки делают рентгеновский датчик стыка более помехоустойчивым, чем коллектор вторичных электронов.

Для анализа степени и характера воздействия помех на выходной сигнал измерительного устройства необходимо учесть временные и спектральные характеристики входного воздействия, сигнала от стыка и помех, воздействующих на датчик. Действие помех зависит от способа выделения информации о положении стыка. В настоящей работе рассмотрено два способа выделения такой информации: метод синхронного детектирования и метод развертывающего преобразования.

Функциональная схема измерительного устройства, построенного по методу синхронного детектирования, изображена на рис. 2.16.

На рис. 4.1 изображена функциональная схема измерительного устройства, построенного по принципу развертывающего преобразования. Следует отметить, что метод синхронного детектирования и метод развертывающего преобразования могут быть использованы при построении измерительных устройств как с рентгеновскими, так и с вторично-эмиссионными датчиками. Здесь  $x_{ст}$  – координаты стыка свариваемого изделия;  $x_n$  – координаты пучка;  $\varepsilon$  – смещение стыка;  $\eta_1$  – помеха, приведенная к выходу датчика, обусловлена неоднородностью поверхности свариваемых деталей (наличие царапин, загрязнений, неоднородность свариваемого материала);  $f$  – помеха, проявляющаяся в

виде наводки, в том числе вызванная пульсациями источника питания электронно-лучевой пушки.

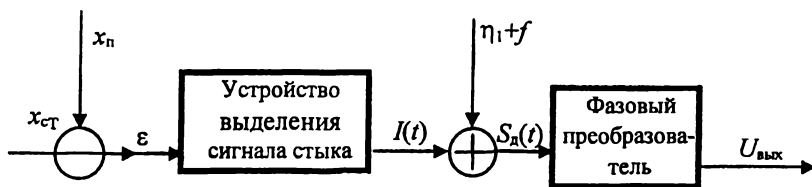


Рис. 4.1. Функциональная схема измерительного устройства

Рассмотрим характеристики входных воздействий и помех, действующих на измерительное устройство, которые необходимы для оценки помехозащищенности и надежности функционирования измерительных устройств.

#### 4.1. Входное воздействие

Электронно-лучевая сварка – это наукоемкий технологический процесс, требующий значительных материальных затрат. Такой вид сварки применяется тогда, когда другие виды сварки являются неэффективными или не обеспечивают необходимого качества сварных соединений. Наибольшее распространение электронно-лучевая сварка получила при производстве изделий аэрокосмической техники, атомной энергетики, нефтехимии. Детали таких изделий изготавливаются достаточно тщательно, имеют фиксированную геометрию и точные размеры. Наиболее часто электронно-лучевая сварка осуществляется для прямолинейных круговых и кольцевых стыковых соединений. Обычно позиционирование изделия в сварочном манипуляторе осуществляется с некоторой погрешностью, поэтому входное воздействие в целом носит случайный характер.

Для прямолинейных стыков можно записать

$$x_{cm}(t) = a + bt, \quad (4.1)$$

где  $a$  и  $b$  – случайные числа, зависящие от точности позиционирования изделия. Максимальная скорость ухода стыка не превышает  $\pm 0,1$  мм/с, т. е. величина  $a$  – случайное число в диапазоне  $a = -2 \dots 2$  мм, величина  $b$  – случайное число в диапазоне  $b = -0,1 \dots 0,1$  мм/с.

Для круговых и кольцевых швов можно записать

$$x_{cm}(t) = a + b \sin(\omega_1 t + \varphi), \quad (4.2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $w_1$  и  $\varphi$  – случайные числа в диапазоне:  $a = -2\dots 2$  мм;  $b = -2\dots 2$  мм;  $w_1 = 0,004\dots 0,4$  с<sup>-1</sup>;  $\varphi = 0\dots 2\pi$ .

Таким образом, входное воздействие может быть описано либо линейной функцией времени, либо как гармоническое воздействие со случайными амплитудой и фазой. Для исследования следящей системы входное воздействие можно рассматривать как детерминированное с известными предельными параметрами, а полученные при этом характеристики системы будут обладать предельными параметрами для всего диапазона возможных случайных воздействий.

## 4.2. Координаты пучка

Координаты пучка складываются из двух составляющих: координаты положения электронно-оптической оси электронно-лучевой пушки и отклонения пучка от этой оси, вызванных воздействием на пучок магнитных полей. Это отклонение может быть вызвано магнитным полем отклоняющей системы, а также магнитными полями помехи, действующей на электронный пучок в процессе ЭЛС. Влияние магнитных полей является одной из главных причин отклонения электронного пучка при ЭЛС. На электронный пучок, помимо однородного поля Земли, действуют магнитные поля, вызванные намагниченностью оснастки, остаточной намагниченностью свариваемых изделий, воздействием различных электромагнитных устройств, действием тока термо-ЭДС [127]. Обычно система слежения за стыком компенсирует отклонение пучка, вызванное действием магнитного поля, однако даже при точном совмещении пучка со стыком на поверхности свариваемых деталей возникает погрешность совмещения пучка со стыком в корне шва. Эта погрешность объясняется тем, что электронный пучок падает на свариваемую поверхность под углом. Практика ЭЛС показала, что при толщине свариваемых деталей 40 мм смещение в корне шва может достигать 3...5 мм [171]. Применяют различные способы уменьшения влияния магнитных полей [14; 75; 129; 164; 177; 180; 190; 196]: размагничивание изделия, экранирование электронного пучка, компенсацию магнитного поля в зоне сварки. Предварительное размагничивание позволяет значительно снизить уровень намагниченности свариваемых деталей, однако не гарантирует от повторного случайного намагничивания. Размагничивание крупногабаритных деталей представляет собой трудоемкий и дорогостоящий процесс. Эффективную защиту от внешних полей оказывает экранирование электронного пучка магнитным экраном, выполненным в виде трубы из магнитомягкого материала. Однако такой экран значительно ухудшает возможность наблюдения за

процессом ЭЛС. Поэтому наиболее приемлемым способом защиты пучка электронов от магнитного поля является его компенсация в зоне сварки. Для этого измеряется продольная составляющая магнитного поля в пространстве пушка-свариваемое изделие и с помощью электромагнитных катушек осуществляется его компенсация [22].

Для оценки влияния магнитного поля на траекторию пучка электронов необходимо получить формулы для расчета отклонения пучка электронов от оси электронно-лучевой пушки, пригодные для расчетов на микроЭВМ в реальном масштабе времени. Интерес также представляет определение угла наклона траектории пучка, поскольку он характеризует отклонение сварного шва от плоскости стыка.

Рассмотрим систему координат  $XYZ$  (рис. 4.2), причем ось  $OZ$  совпадает с геометрической осью электронно-лучевой пушки. Предположим, что на электрон, первоначально движущийся со скоростью  $V$ , направленной вдоль оси  $OZ$ , начинает воздействовать магнитное поле с вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ , совпадающим с плоскостью  $XOZ$ , и известен закон распределения по оси  $Z$  его составляющих  $B_y = f(z)$ ,  $B_z = \varphi(z)$ , которые могут быть определены расчетным или экспериментальным способом.

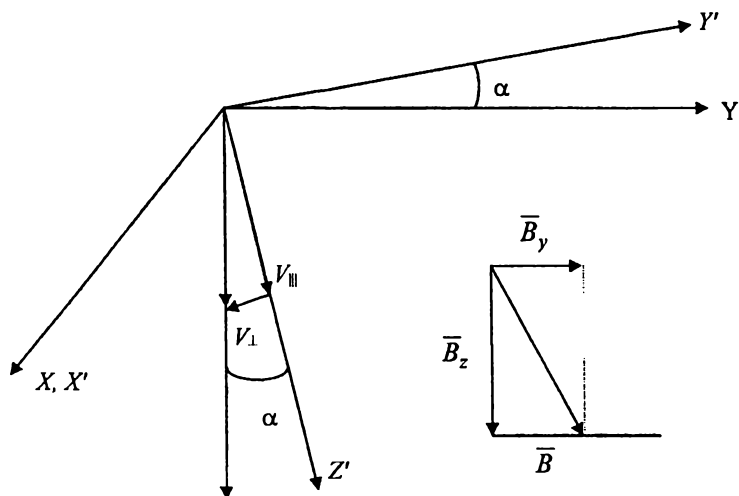


Рис. 4.2. К определению отклонения электронного пучка в магнитном поле

Скорость движения электронов  $V$  (м/с) можно рассчитать по известному ускоряющему напряжению  $U$  (В) по формуле [72]

$$V = \frac{5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U(1 + 0,983 \cdot 10^{-6} U)}}{1 + 1,967 \cdot 10^{-6} U}.$$

Разложим скорость движения электрона на две составляющие:

$$V_{\parallel} = V \cos \alpha, \text{ направленную параллельно } \vec{B};$$

$$V_{\perp} = V \sin \alpha, \text{ направленную перпендикулярно } \vec{B},$$

$$\text{где } \alpha = \operatorname{arctg} \frac{B_y(z)}{B_z(z)}.$$

В результате воздействия  $V_{\perp}$  и индукции  $\vec{B}$  электрон будет двигаться по окружности, лежащей в плоскости  $X'OY'$ , перпендикулярной вектору  $\vec{B}$  с радиусом, определяемым по формуле [168]

$$R = \frac{mV_{\perp}}{e \cdot B(z)},$$

где  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$  – масса электрона;  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  – заряд электрона,

$K$ ;  $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$  – масса покоя электрона, кг;  $c = 2,977 \cdot 10^8$  – скорость света, м/с.

Кроме того, электрон двигается со скоростью  $V_{\parallel}$  вдоль оси  $OZ'$  параллельно вектору  $\vec{B}$ .

Кривизну траектории можно определить как

$$K = \frac{1}{R} = \frac{eB(z)}{mV_{\perp}}.$$

Считая, что  $K = \frac{d\psi}{ds} = \frac{d\psi}{dtV_{\perp}}$ , находим

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{eB(z)}{m},$$

где  $\psi$  – угол наклона касательной к траектории на плоскости  $X'OY'$ .

Определим проекции скорости электрона на оси координат  $X'Y'Z'$ :

$$\begin{cases} V_{Y'} = V_{\perp} \cos \psi = V \sin \alpha \cos \psi, \\ V_{X'} = V_{\perp} \sin \psi = V \sin \alpha \sin \psi, \\ V_{Z'} = V_{\parallel} = V \cos \alpha. \end{cases}$$

Используя формулы преобразования координат при повороте осей [82] и заменяя  $t$  на  $z$ , получим систему дифференциальных уравнений траектории электрона:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dz} &= \frac{\sin \alpha \cos \alpha (\cos \psi - 1)}{1 + \sin^2 \alpha (\cos \psi - 1)}, \\ \frac{dx}{dz} &= \frac{\sin \alpha \sin \psi}{1 + \sin^2 \alpha (\cos \psi - 1)}, \\ \frac{d\psi}{dz} &= \frac{eB(z)}{mV[1 + \sin^2 \alpha (\cos \psi - 1)]}. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Наличие нелинейности в уравнениях (4.3) свидетельствует о возможности решения системы только численными методами с применением ЦВМ.

В условиях сварочного производства имеют место слабые магнитные поля, вызывающие относительно небольшие изменения траектории пучка электронов. В этом случае систему уравнений можно значительно упростить, полагая, что при малых  $\psi$   $\sin \psi = \psi$ ,  $\cos \psi = 1$ . В случае когда неоднородное магнитное поле направленно перпендикулярно траектории электронного пучка  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  после несложных преобразований, изложенных в работе [108], получим простые приближенные формулы:

$$\psi = \frac{e}{mV} \int_0^z B(z) dz, \quad x = \frac{e}{mV} \int_0^z \int_0^z B(z) dz dz. \quad (4.4)$$

Погрешность расчетов по формулам (4.4) для большинства случаев, имеющих место на практике, не превышает 2,5 %.

По формулам (4.4) удастся получить аналитические решения для многих случаев, имеющих место при ЭЛС.

Рассмотрим два примера, имеющие практическое значение.

*Пример 1.* На электронный пучок воздействует однородное магнитное поле с напряженностью  $H = 40$  А/м (это поле примерно равно магнитному полю Земли), направленное перпендикулярно оси электронно-лучевой пушки. Требуется рассчитать отклонение  $x$  и угол  $\psi$  на расстоянии 250 мм. Результаты расчетов по формулам (4.4) сведены в табл. 4.1. Из приведенных расчетов следует, что магнитное поле Земли приводит к заметному отклонению электронного пучка и его влияние

необходимо учитывать. В любых случаях целесообразно ориентировать сварочные установки так, чтобы силовые линии геомагнитного поля были перпендикулярны плоскости сварного стыка. Тогда возникающие отклонения будут лежать в плоскости стыка.

Таблица 4.1

U, кВ	20	30	40	50	60	70	80	90	100
x, мм	3,26	2,65	2,28	2,03	1,85	1,7	1,58	1,50	1,40
ψ, град	1,49	1,21	1,04	0,93	0,85	0,78	0,73	0,68	0,64

*Пример 2.* На электронный пучок с ускоряющим напряжением 30 кВ действует магнитное поле, вызванное остаточной намагниченностью свариваемого изделия, описываемое выражением

$$H(z) = \frac{aH_1}{a + (z-l)^2},$$

где  $H_1$  – напряженность магнитного поля вблизи поверхности свариваемого изделия;  $l$  – расстояние от свариваемого изделия до среза фокусирующей системы электронно-лучевой пушки;  $a$  – постоянный коэффициент.

Требуется определить отклонение пучка и угол касательной к траектории в точке  $z = l = 250$  мм при значениях  $a = 3$  мм,  $H_1 = 272$  А/м.

Используя выражение (4.4), получим:

$$\psi = \frac{e}{mV} \sqrt{a} B_1 \operatorname{arctg} \frac{l}{\sqrt{a}} = 0,0425 = 2,44^\circ,$$

$$x = \frac{e}{mV} \frac{a}{2} B_1 \ln \frac{a+l^2}{a} = 2,65 \text{ мм.}$$

Анализируя рассматриваемые примеры, видим, что отклонения пучка при равных ускоряющих напряжениях равны, тогда как углы наклона траектории отличаются в два раза. Это говорит о том, что при воздействии магнитных полей, сконцентрированных вблизи свариваемого изделия, могут иметь место значительные углы касательной к траектории, которые в неблагоприятном случае отклонения электронного пучка перпендикулярно плоскости стыка приводят к дополнительному отклонению в корне стыка, равному  $\varepsilon'' = \psi \cdot d$ , где  $d$  – толщина свариваемого изделия. Это обстоятельство объясняет промахи в корне шва при сварке изделий с остаточной намагниченностью.

Следует отметить, что отклонение пучка с помощью электро-

магнитной отклоняющей системы также приводит к возникновению угла наклона траектории, который может быть рассчитан по формуле

$$\psi_1 = \frac{x}{l_k},$$

где  $x$  – отклонение пучка от электронно-оптической оси пушки;  $l_k$  – расстояние от центра отклоняющей системы до поверхности свариваемого изделия.

На рис. 4.3 изображена схема совместного воздействия магнитного поля помехи и отклоняющей системы, причем воздействие отклоняющей системы выбирается таким, чтобы скомпенсировать отклонение пучка, вызванное магнитным полем помехи.

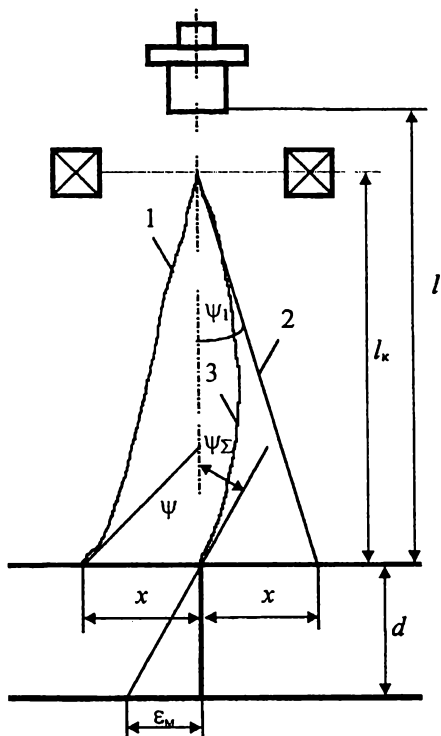


Рис. 4.3. Схема воздействия магнитного поля помехи и отклоняющей системы: 1 – траектория пучка под воздействием магнитного поля помехи; 2 – траектория пучка от воздействия отклоняющей системы; 3 – результирующая траектория



Результирующий угол наклона траектории может быть рассчитан по формуле

$$\psi_{\Sigma} = \psi - \psi_1 = \frac{e}{mV} \int_0^l H(z) dz - \frac{e}{mV} \frac{1}{l_{\kappa}} \int_0^l \int_0^l H(z) dz dz.$$

В результате наличия угла касательной к траектории  $\psi_{\Sigma}$  в корне шва появляется погрешность совмещения электронного пучка со стыком, равная

$$\varepsilon_{\Sigma} = \psi_{\Sigma} \cdot d. \quad (4.5)$$

Функциональная схема следящей системы для совмещения электронного пучка со стыком свариваемого изделия изображена на рис. 4.4. На этой схеме введены обозначения:  $W_{\text{кы}}(s)$  – передаточная функция измерительного устройства;  $W_{\text{сц}}(s)$  – передаточная функция следящей системы;  $\varepsilon$  – ошибка в положении пучка относительно стыка на поверхности обрабатываемого изделия;  $\varepsilon_{\Sigma}$  – ошибка в положении пучка относительно корня шва, вызванная наличием угла касательной к траектории от действия на пучок электромагнитного поля помехи и отклоняющей системы.

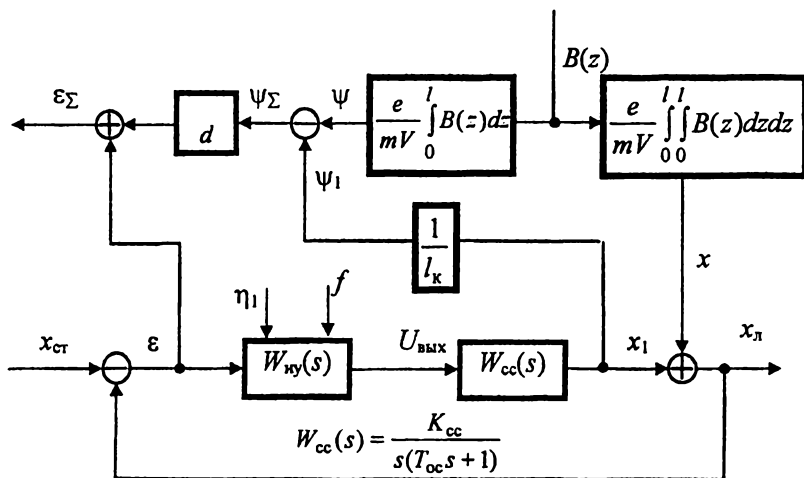


Рис. 4.4. Функциональная схема следящей системы

Из структурной схемы видно, что задающим воздействием для системы является координата стыка  $x_{\text{ст}}$ . Выходной координатой системы является координата пучка, которая складывается из двух координат: координаты  $x_1$ , возникающей в виде реакции следящей системы на рассогласование, преобразованное в перемещение пучка с помощью

отклоняющей системы, и отклонения пучка  $x$ , возникающего за счет действия магнитного поля помехи. Следящая система должна в равной степени обрабатывать как координату стыка  $x_{ст}$ , так и координату  $x$ , связанную с действием магнитных полей. Поэтому возникает необходимость анализа временных и спектральных характеристик магнитного поля помехи  $B(z)$  или эквивалентного отклонения  $x$ . С этой целью проведены измерения магнитных полей в рабочем пространстве пушка-свариваемое изделие по длине стыков. Для исследования магнитных полей был разработан и изготовлен цифровой измеритель магнитных полей (рис. 4.5) с феррозондовым датчиком. Выход с измерителя подключался к магнитофону, информация с которого поступала в ЦВМ. Моменты записи информации определялись импульсами датчика перемещения.

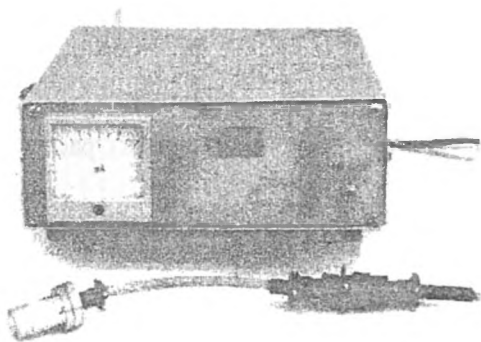


Рис. 4.5. Измеритель напряжения магнитного поля

Исследования магнитных полей проведены в производственных условиях при сварке изделий из материалов АМГ-6, ВСН-25, ЭИ-654, Х18Н10Т. На рис. 4.6...4.9 изображены экспериментальные реализации магнитного поля. По экспериментальным реализациям напряженности магнитного поля, снятым при различных значениях  $z$ , производились вычисления отклонения пучка  $x$  и угла  $\psi$  по следующим формулам:

$$\psi = \frac{e}{mV} \left( B_0 l + B_1 \frac{l^2}{2} + B_2 \frac{l^4}{4} + B_3 \frac{l^5}{5} + B_4 \frac{l^6}{6} \right),$$

$$x = \frac{e}{mV} \left( B_0 \frac{l^2}{2} + B_1 \frac{l^3}{6} + B_2 \frac{l^4}{12} + B_3 \frac{l^5}{20} + B_4 \frac{l^6}{30} + B_5 \frac{l^7}{42} \right),$$

при этом коэффициенты  $B_0 \dots B_5$  определялись из уравнений:

$$B(0) = B_0,$$

$$B(z_1) = B_0 + B_1 z_1 + B_2 z_1^2 + B_3 z_1^3 + B_4 z_1^4 + B_5 z_1^5,$$

$$B(z_2) = B_0 + B_1 z_2 + B_2 z_2^2 + B_3 z_2^3 + B_4 z_2^4 + B_5 z_2^5,$$

$$B'(0) = B_1,$$

$$B'(z_1) = B_1 + 2B_2 z_1 + 3B_3 z_1^2 + 4B_4 z_1^3 + 5B_5 z_1^4,$$

$$B'(z_2) = B_1 + 2B_2 z_2 + 3B_3 z_2^2 + 4B_4 z_2^3 + 5B_5 z_2^4,$$

где  $B(z_k) = \mu\mu_0 H(z_k)$ ;  $H(z_k)$  – напряженность магнитного поля в точках  $z = z_k$ ;  $B'(z_k) = \mu\mu_0 H'(z_k)$ ;  $H'(z_k) = \frac{dH}{dz} \Big|_{z=z_k}$  – производные по  $z$  от напряженности  $H(z)$  в точках  $z = 0$ ,  $z = z_1$ ,  $z = z_2$  (точке  $z = 0$  соответствовал уровень выхода пучка из фокусирующей системы);  $z_1 = 150$  мм;  $z_2 = 210$  мм;  $l = 250$  мм. Производные  $H'(z)$  рассчитывались по формуле Лагранжа

$$\frac{dH}{dz} \Big|_{z=z_k} \approx \frac{H(z_k^1) - H(z_k^2)}{\Delta z_k},$$

где  $z_k^1$  и  $z_k^2$  – координаты  $z$  в окрестностях точки  $z_k$ , причем  $z_k^2 - z_k^1 = \Delta z$ .

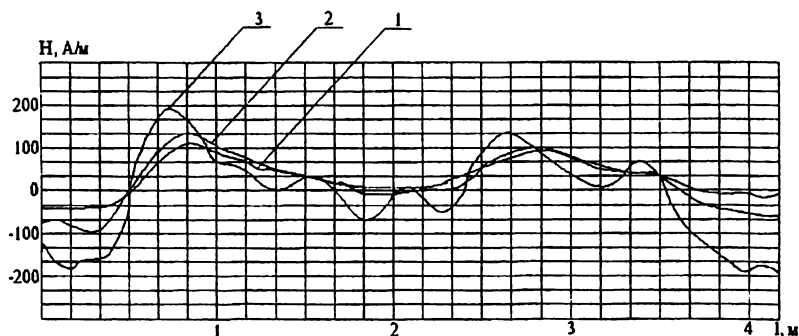


Рис. 4.6. Распределение напряженности магнитного поля в рабочем пространстве при сварке коробчатого шпангоута (внутренний стык, материал сталь + медь): 1 –  $z = 70$  мм; 2 –  $z = 120$  мм; 3 –  $z = 250$  мм

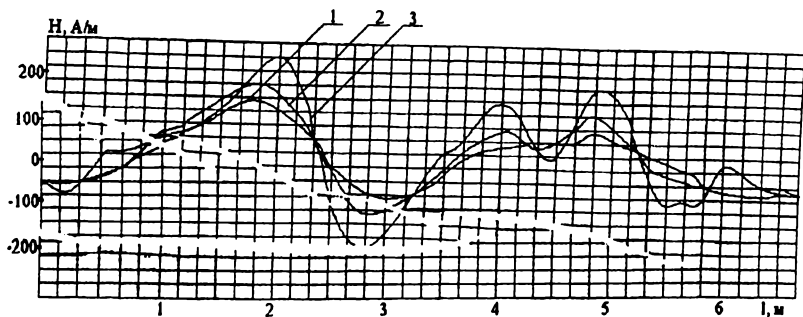


Рис. 4.7. Распределение (рис. 4.6, внешний стык): 1 –  $z = 70$  мм; 2 –  $z = 120$  мм; 3 –  $z = 250$  мм

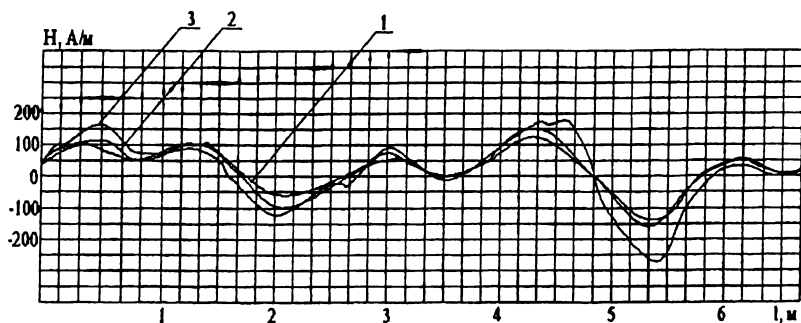


Рис. 4.8. Распределение магнитного поля в рабочем пространстве при сварке конических обечашек (материал сталь + медь): 1 –  $z = 70$  мм; 2 –  $z = 120$  мм; 3 –  $z = 250$  мм

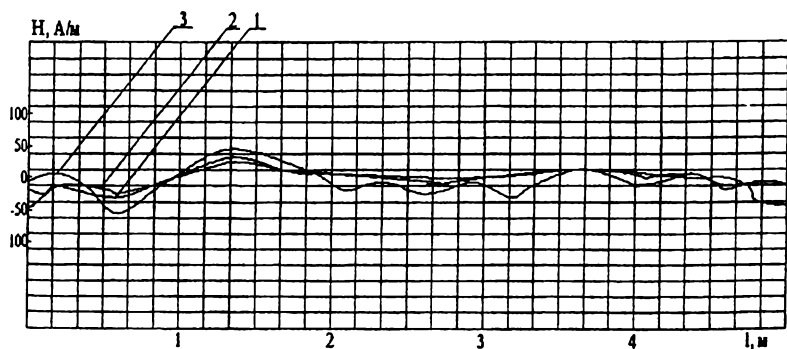


Рис. 4.9. Распределение магнитного поля в рабочем пространстве при сварке цилиндрических обечашек из сплава АМг-6 (продольный стык): 1 –  $z = 70$  мм; 2 –  $z = 120$  мм; 3 –  $z = 250$  мм

Расчет вероятностных характеристик производится по формулам:

$$M_{\psi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \psi_i - \text{математическое ожидание угла};$$

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \text{математическое ожидание отклонения};$$

$$\psi_i^0 = \psi_i - M_{\psi} - \text{центрированная случайная величина угла};$$

$$X_i^0 = X_i - M_x - \text{центрированное случайное отклонение};$$

$\rho_{\psi} = \sum_{i=1}^{n-l-1} \psi_i^0 \cdot \psi_{i+l}^0 / d_{\psi} l$  – нормированная корреляционная функция по углу;

$$\rho_x = \sum_{i=1}^{n-l+1} X_i^0 \cdot X_{i+l}^0 / D_x l - \text{нормированная корреляционная функция}$$

по отклонению пучка;

$$D_{\psi} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \psi_i^2 - \text{дисперсия угла};$$

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \text{дисперсия отклонения пучка}.$$

В результате расчетов на ЭВМ получены следующие результаты. Среднеквадратическое отклонение угла

$$\sigma_{\psi} = \sqrt{D_{\psi}} = 0,01 \text{ рад.}$$

Среднеквадратическое отклонение пучка

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = 2,2 \text{ мм.}$$

На рис. 4.10 изображена нормированная корреляционная функция отклонения пучка, которая может быть аналитически описана выражением

$$\rho_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau,$$

где  $\alpha = 1,69 \cdot 10^{-2}$ ;  $\beta = 8,81 \cdot 10^2$  рад/с.

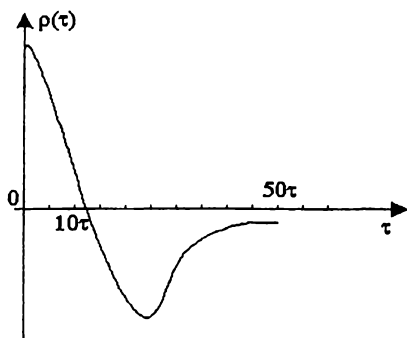


Рис. 4.10. Нормированная корреляционная функция отклонения пучка электронов

Соответствующая полученной корреляционной функции нормированная спектральная плотность описывается выражением

$$S_x(\omega) = \frac{\alpha}{\pi[\alpha^2 + (\beta + \omega)^2]} + \frac{\alpha}{\pi[\alpha^2 + (\beta - \omega)^2]}.$$

На рис. 4.11 изображен график нормированной спектральной плотности.

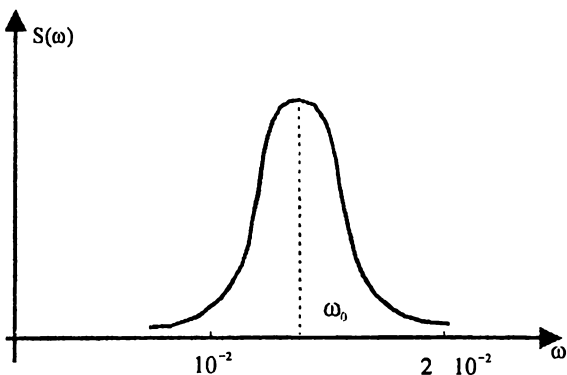


Рис. 4.11. Нормированная спектральная плотность отклонения пучка электронов:  $\omega_0 = 8,81 \cdot 10^{-2}$  рад/с

Из графика видно, что энергия помехи, приведенной к эквивалентному отклонению пучка от действия магнитного поля, сосредоточена в окрестностях частоты  $\omega_0 = \beta = 8,81 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Это говорит о том,

что частотный спектр помехи, обусловленной отклонением пучка под действием магнитных помех, находится в таком же диапазоне низших частот, как и задающее воздействие – отклонение стыка  $x_{ст}$ .

#### 4.3. Помеха, обусловленная неоднородностью поверхности свариваемого изделия

При зондировании стыка сканирующим электронным пучком в выходном сигнале датчика возникают пульсации, вызванные неоднородностью поверхности обрабатываемого изделия, приводящей к изменению коэффициента вторично-электронной эмиссии или рентгеновского излучения. Эти изменения могут быть вызваны шероховатостью поверхности, наличием забоин, царапин, химической неоднородностью свариваемого материала, приводящей к изменению коэффициента вторично-электронной эмиссии или интенсивности рентгеновского излучения, а также наличием различных загрязнений. От помех такого рода невозможно избавиться, так как их природа заключена в физической сущности способа получения информации о положении стыка. Для исследования такой помехи и ее влияния на форму сигнала датчика можно пользоваться экспериментально полученными реализациями сигнала от стыка [117]. Получение таких реализаций связано с определенными трудностями и требует создания специальной аппаратуры. На рис. 4.12 изображена блок-схема устройства для исследования помехозащищенности датчика стыка. Устройство содержит микроЭВМ, устройство связи с объектом УСО, прибор управления пучком ПУЛ, датчик стыка Д, магнитофон, осциллограф. В состав УСО входят цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи.

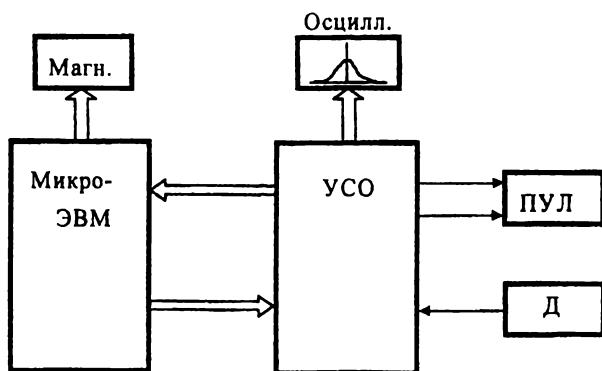


Рис. 4.12. Блок-схема устройства для исследования помехозащищенности датчика стыка

Устройство работает следующим образом. В дискретных точках траектории зондирования стыка электронным пучком микроЭВМ считывает показания датчика стыка и запоминает их в ячейках памяти. После прохождения всей траектории зондирования пучок возвращается в исходное положение и процесс сварки возобновляется. Затем производится новый цикл зондирования. Снятые при этом показания датчика запоминаются. Устройство реализовано на базе универсального программируемого контроллера «Электроника МС-2702». Связь контроллера с внешними устройствами осуществляется через шесть портов (А, В, С, А<sub>1</sub>, В<sub>1</sub>, С<sub>1</sub>), входящих в состав контроллера.

На контроллер возложены следующие задачи:

- управление сканированием пучка;
- запуск аналого-цифрового преобразователя и фиксация показаний датчика;
- запоминание отдельных реализаций и их первоначальная обработка;
- настройка коэффициента измерительного усилителя и компенсация постоянной составляющей сигнала;
- вывод реализации на осциллограф;
- фиксация полученных реализаций на магнитофон.

Особенностью работы устройства является то, что исследование сигнала датчика стыка производится в широком диапазоне изменения тока пучка – от 1 до 400 мА, поэтому необходима подстройка коэффициента усиления измерительного усилителя и компенсация постоянной составляющей сигнала, для этого измерительный усилитель управляется контроллером через ЦАПХ и ЦАПУ по специальной программе «Настройка измерительного устройства».

С целью исключения влияния помех, связанных с пульсациями источников питания электронно-лучевой пушки, и помех, связанных с промышленной сетью, работа устройства синхронизируется с фазой промышленной сети в момент, когда напряжение сети становится максимальным. При этом изменение тока будет минимальным. Синхронизация производится генератором синхронизации сети ГСС путем подачи импульса на одну из линий порта С<sub>1</sub>.

Внешний вид устройства для исследования помехозащищенности датчика стыка показан на рис. 4.13.

Помехозащищенность датчика стыка определяется по полученным в результате эксперимента реализациям сигнала от стыка с помощью статистической обработки, которая производится в три этапа [105].

На первом этапе производится осреднение показаний датчика из



множества реализаций для каждой  $x_i$  точки разветвки пучка. Полученная осредненная реализация выводится на экран осциллографа. Производится визуальная оценка формы сигнала от стыка. На этом этапе выявляется зависимость формы сигнала от стыка, технологических параметров сварки: тока пучка, ускоряющего напряжения, тока фокусирующей линзы. Полученные реализации и осредненная реализация выводятся на магнитофон.

На втором этапе данные вводятся в ЭВМ высокого уровня и подвергаются статистической обработке. Статистическая обработка включает в себя ряд последовательных операций. Находятся математические ожидания сигнала датчика в дискретные моменты времени по формуле

$$I_{cp}(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(t_j).$$

По дискретным значениям строятся графики отдельных реализаций и график математических ожиданий  $I_{cp}(t)$ .

На рис. 4.14...4.16 показаны графики отдельных реализаций сигнала для рентгеновского датчика стыка. На рис. 4.16 показан график математического ожидания, построенного по восьми реализациям (реализация 9). На всех графиках осью абсцисс является номер точки измерения. Цена одного деления составляет 0,1 мм. Учитывая, что полное время измерения составляет 1 мс, цена деления для временной шкалы составляет 0,03 мс. По оси ординат отложена цифровая шкала, которой измеряется амплитуда сигнала датчика. Для восьмиразрядного контроллера эта шкала представлена в диапазоне от -127 до 127.

Анализируя полученные реализации, можно сделать вывод, что сигнал датчика искажается случайными помехами, действие которых значительно снижается при их осреднении. Из рассчитанных средних

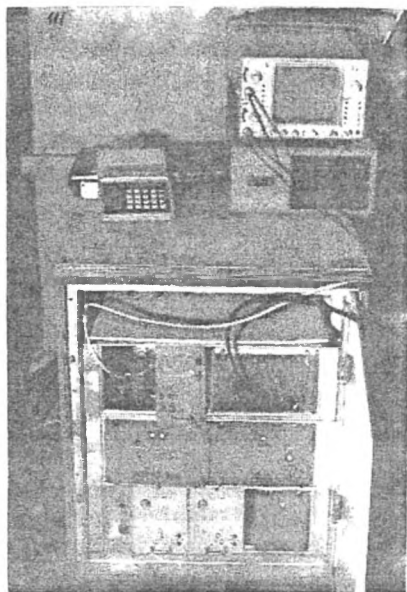


Рис. 4.13. Устройство для исследования помехозащищенности датчика стыка

значений сигнала от стыка выделяется идеализированный сигнал от стыка. С этой целью функция средних значений  $I_{cp}(x)$  аппроксимируется функцией

$$I(x) = A \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right].$$

При этом  $A$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  подбираются таким образом, чтобы средняя сумма отклонений была минимальна:

$$D_{is} = \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{32} \left[ I_{cp}(j) - A \exp \left[ -\frac{(x_j - \varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] \right]^2 = \min.$$

Программа, оптимизирующая функцию  $I(x)$  по параметрам  $A$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ , построена по методу координатного спуска. Первоначальная установка параметров производится по функции средних значений  $I_{cp}(x)$ , где определяется максимальное значение AMPL и соответствующее ей значение  $A$ . Смещение точки AMPL по координате  $x$  от центра развертки задает начальное значение  $\varepsilon$ , а ширина половины импульса на уровне 0,606 AMPL задает начальное значение  $\sigma$ . На рис. 4.17 изображен результат оптимизации функции средних значений  $I_{cp}(x)$  функцией  $I(x)$  при значениях  $A = 106$ ,  $\sigma = 1,8$ ,  $\varepsilon = 21$ .

Затем производится построение корреляционной функции для сигнала от стыка  $I(x)$  по формуле

$$K_x(\tau) = \frac{1}{32 - \tau} \sum_{j=1}^{32 - \tau} I(x_j) I(x_{j+\tau}).$$

при  $\tau = 1, 2, \dots, 16$ .

На рис. 4.18 показана нормированная корреляционная функция сигнала от стыка. Нормирование производилось делением величин на дисперсию  $K_x(0)$ .

По полученной нормированной корреляционной функции строится нормированная спектральная плотность по формуле

$$S_x(f) = \frac{2}{\pi} \int_0^T K_x(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau.$$

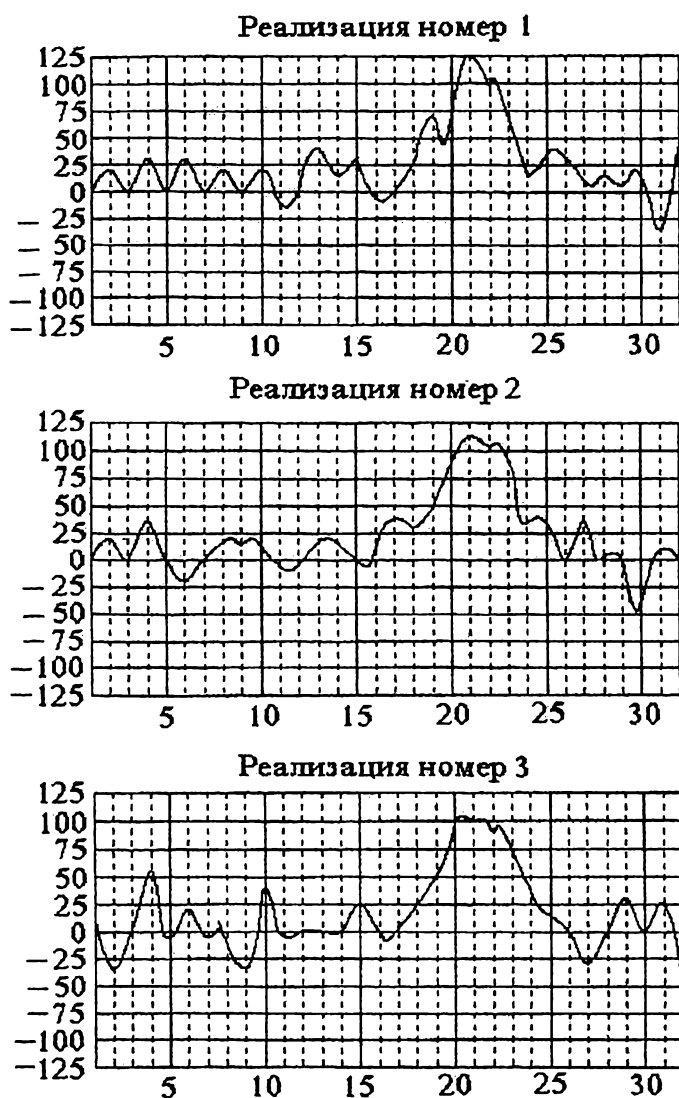


Рис. 4.14. Графики отдельных реализаций сигнала стыка



Рис. 4.15. Графики отдельных реализаций сигнала стыка

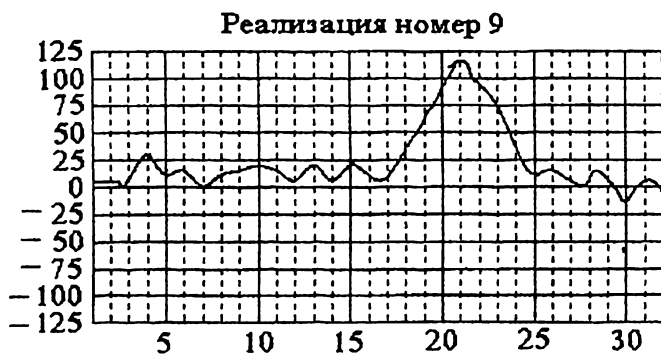


Рис. 4.16. Графики отдельных реализаций сигнала стыка

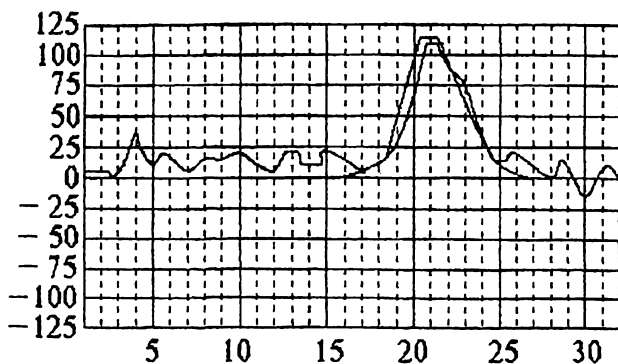


Рис. 4.17. Аппроксимация сигнала стыка от стыка выражением

$$I(x) = A \cdot \exp\left[-\frac{(x - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right] \text{ по параметрам } \sigma, \varepsilon, A$$

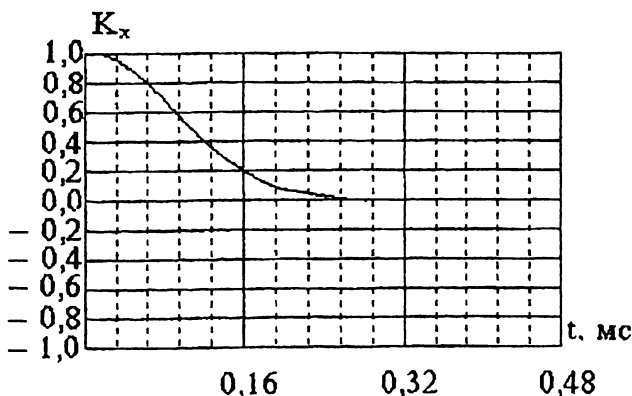


Рис. 4.18. Нормированная автокорреляционная функция оптимизированного сигнала от стыка:  $K_x(0) = 1183,48$

На рис. 4.19 показана нормированная спектральная плотность сигнала от стыка.

Из графика видно, что спектр сигнала от стыка лежит в диапазоне частот от 0 до 5 кГц.

Определим помеху как разность между реализацией сигнала от стыка с помехой и идеализированного сигнала от стыка:

$$\eta(t) = I_j(t) - I(t).$$

Корреляционная функция помехи  $\eta(t)$

$$K_{\eta}(\tau) = \frac{1}{32 - \tau} \left\{ \sum_{j=1}^{32-\tau} \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \eta(x_{ij}) \eta(x_{i,j+\tau}) \right\}$$

при  $\tau = 1, 2, \dots, 16$ .

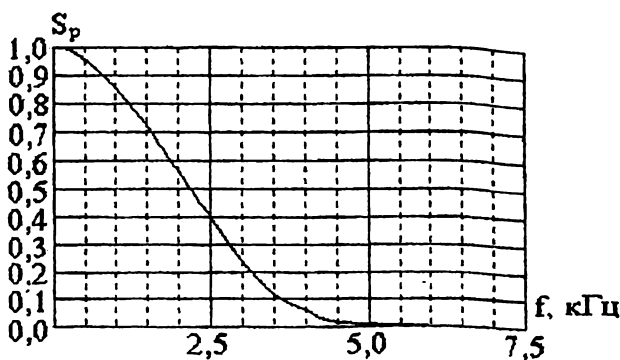


Рис. 4.19. Нормированная спектральная плотность энергии

На рис. 4.20 изображена нормированная корреляционная функция помехи.

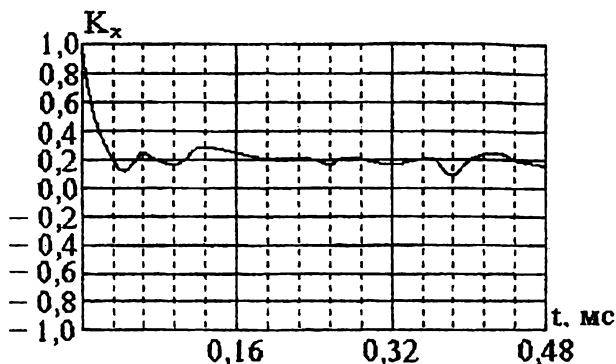


Рис. 4.20. Нормированная корреляционная функция исследуемой помехи:  $K_x(0) = 342,818$

На рис. 4.21 изображена нормированная спектральная плотность помехи, рассчитываемая по формуле

$$S_{\eta}(f) = \frac{2}{\pi_0} \int_0^T K_{\eta}(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau.$$

Из графиков видно, что корреляционные связи помехи быстро затухают, приближаясь к постоянному значению.

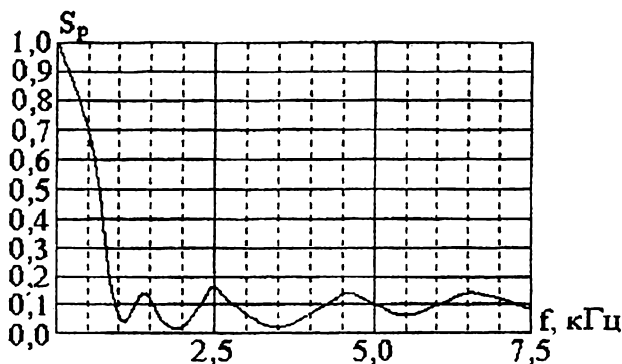


Рис. 4.21. Нормированная спектральная плотность энергии исследуемого сигнала помехи:  $S_p(0) = 0,6825$

Для того чтобы определить вероятностные характеристики помехи  $\eta$ , необходимо получить закон ее распределения по экспериментальным данным. Для этого обычно находится статистический ряд и строится гистограмма. Гистограмма, построенная в соответствии с статистическим рядом, полученным при токе пучка 100 мА, изображена на рис. 4.22. Как видно, данное распределение достаточно хорошо описывается нормальным законом, плотность вероятности которого соответствует выражению

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

при численных значениях: математическое ожидание  $m = 7,59$ ; среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 18,5$ . Проверка согласованности экспериментальных данных с принятым нормальным законом распределения была осуществлена по  $\chi^2$  критерию Пирсона. Мера расхождения эксперимента от закона распределения вычислялась по формуле [67]

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}$$

Расчеты по указанной формуле при  $\chi^2 = 11,48$  и числе степеней свободы  $r = 12$  показывают, что вероятность того, что за счет случайных причин мера расхождения не будет больше теоретической, состав-



ляет  $p = 0,5$ . Таким образом, выбранный нормальный закон распределения можно считать соответствующим экспериментальным данным. Для этого эксперимента отношение амплитуды импульса от стыка к среднеквадратическому отклонению помехи составляет  $\frac{A}{\sigma} = 5,7$ . Из этого соотношения видно, что при нормальном распределении вероятность того, что амплитуда помехи превысит амплитуду импульса от стыка, ничтожно мала.

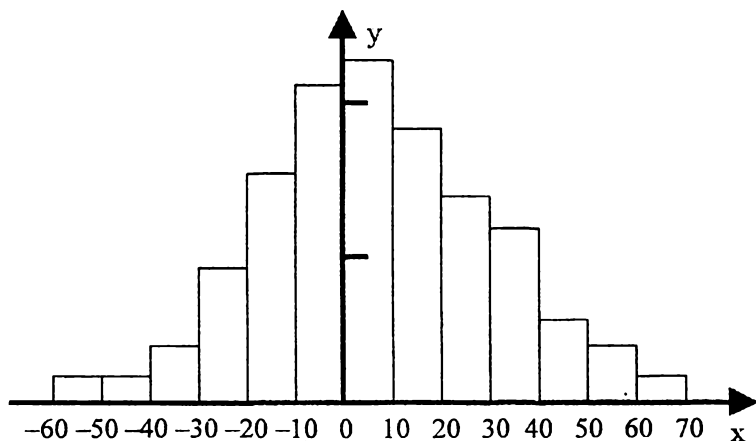


Рис. 4.22. Гистограмма распределения помехи

Следует заметить, что среднеквадратическое отклонение помехи для данного тока пучка будем считать величиной неизменной тогда, когда амплитуда импульса от стыка пропорциональна коэффициенту модуляции  $K_m$ , зависящему от отношения диаметра пучка к зазору в стыке  $\sigma_n/h_s$  в соответствии с выражением (2.47). Экспериментальные данные, полученные при токе пучка 100 мА, соответствуют  $\sigma_n = 0,4$  мм,  $h_s = 0,3$  мм. При этом коэффициент глубины модуляции составляет  $K_m = 0,24$ .

Если же зазор в стыке будет уменьшен до 0,1 мм, т. е. в 3 раза, то коэффициент глубины модуляции, а следовательно, и амплитуда импульса от стыка также уменьшается в 3 раза, что обычно имеет место на практике. В этом случае отношение  $\frac{A}{\sigma} = 1,9$  и вероятность того, что амплитуда помехи превысит амплитуду сигнала стыка, будет равна 0,0288 [67], т. е. является заметной величиной. Наличие сбоя в работе устройства контроля положения стыка становится вероятным. Этим

объясняется низкая надежность большинства систем слежения по стыку на рабочем токе.

Проведенные исследования помех вторично-эмиссионного датчика положения стыка для различных токов электронного пучка дают следующие результаты. При токе пучка  $I_n = 5$  мА получены следующие характеристики случайного процесса:

математическое ожидание  $m = 0$ ;

среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 2$ ;

амплитуда импульса от стыка  $A = 48$ .

В этом случае отношение  $A/\sigma = 24$  при зазоре в стыке, равном 0,5 мм, говорит о хорошем преобладании сигнала от стыка над помехой.

При токе электронного пучка  $I_n = 51$  мА построены следующие характеристики помехи:

математическое ожидание  $m = 0$ ;

среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 7$ ;

амплитуда сигнала от стыка  $A = 45$ .

Отношение  $A/\sigma = 6,42$  при зазоре в стыке  $h_s = 0,5$  мм говорит уже о существенном уровне помех, который значительно возрастает при уменьшении зазора в стыке.

При токе электронного пучка  $I_n = 62$  мА получены следующие характеристики помех:

математическое ожидание  $m = 0$ ;

среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 7$ ;

амплитуда сигнала от стыка  $A = 24$ .

Отношение  $A/\sigma = 3,29$  при величине зазора в стыке  $h_s = 0,5$  мм говорит о весьма значительном уровне помех. При уменьшении зазора в стыке до 0,1 мм система слежения с таким датчиком не будет обладать необходимой надежностью без специальных методов повышения помехозащищенности.

На рис. 4.23 изображены характеристики сигнала от стыка вторично-эмиссионного датчика, полученные путем усреднения восьми экспериментальных реализаций сигнала.

Из этих характеристик видно, что при увеличении тока электронного пучка импульс от стыка проявляется на фоне спадающего уровня вторичной эмиссии. Причем изменение уровня вторичной эмиссии превосходит амплитуду импульса от стыка. Это явление объясняется тем, что в процессе электронно-лучевой сварки над сварочной ванной образуется плазменное облако, содержащее медленные тепловые электроны и отрицательно заряженные ионы, которые при внесении зондирующего сканирования рассасываются не сразу, а с некоторой задержкой, и это сопровождается изменением уровня сигнала вторич-

но-эмиссионного датчика. Это явление затрудняет выделение импульса стыка, так как для получения информации из сигнала датчика вторичной эмиссии следует вычитать математическое ожидание падения уровня вторично-электронной эмиссии, которое зависит от тока пучка и других факторов. Следует отметить, что для вторично-эмиссионного датчика происходит более значительное усиление уровня помехи относительно полезного сигнала при увеличении тока сварки по сравнению с рентгеновским датчиком. Эти данные подтверждают утверждения ряда авторов о том, что рентгеновские датчики положения стыка обладают более высокой помехозащищенностью по сравнению с вторично-эмиссионными датчиками.

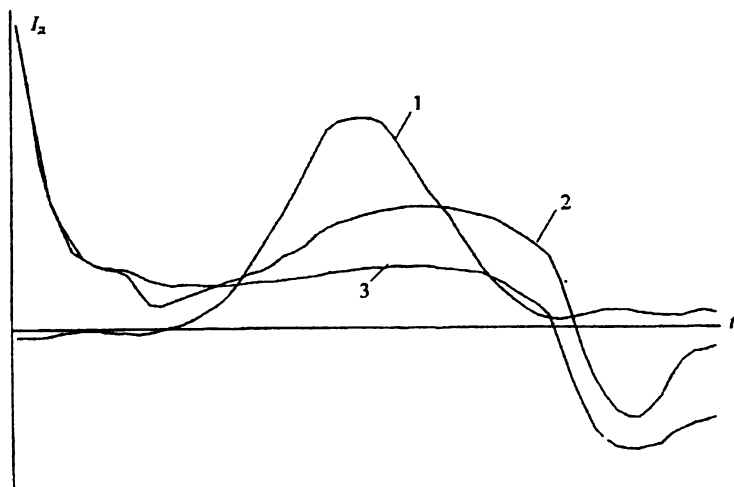


Рис. 4.23. Характеристика сигнала датчика стыка:  
 1 —  $I_d = 5$  мА; 2 —  $I_d = 51$ ;  $I_d = 62$  мА

#### 4.4. Помеха, обусловленная наводками на датчик положения стыка

Эта помеха характеризуется тем, что она суммируется с выходным полезным сигналом датчика. Она обусловлена электромагнитными наводками на датчик и его электрические цепи различных импульсных или гармонических составляющих, вызванных работой электрических машин, пульсаций тока в отклоняющей системе электронно-лучевой пушки, флуктуациями тока усилительно-преобразовательного тракта. К этому току помехи также относятся пульсации сигнала датчика, вызванные колебаниями тока электронного пучка. Компоненты этой по-

мехи имеют характерный спектр и поэтому могут быть подавлены частотными фильтрами. Это является отличительной особенностью указанного вида помех от помехи  $\eta$ , которая вызвана неоднородностью обрабатываемого изделия, рассмотренной в предыдущем разделе. Помеха  $\eta$  может быть снижена только с помощью специальной подготовки поверхности обрабатываемого изделия, что не всегда осуществимо, так как, например, при ЭЛС изделий из алюминиевых сплавов для снятия оксидной пленки применяют шабрение, приводящее к увеличению неоднородности обрабатываемой поверхности. Помеха  $\eta$  не может быть подавлена электрическими фильтрами, поскольку ее природа связана со способом формирования сигнала от стыка и частотный спектр близок к частотному спектру сигнала от стыка. Так, например, при применении метода синхронного детектирования помеха от неоднородности поверхности модулируется частотами сканирования, так же как полезный сигнал, и не может быть отделена от информации о положении стыка избирательными фильтрами, поскольку имеет ту же частоту, что и полезный сигнал.

Помеха, обусловленная наводками на датчик положения стыка, кроме случая наводок от отклоняющей системы, имеет характерный частотный спектр и может быть подавлена методами частотной селекции. Величина и спектральный состав помехи зависят от конкретного исполнения измерительного устройства, способов экранирования, наличия вблизи датчиков положения стыка электродвигателей и других электромагнитных устройств. Рассмотрим приемы, позволяющие снизить уровень помех.

В первую очередь это относится к экранированию датчика и его токоподводящих цепей. С точки зрения защиты от наводок рентгеновский датчик имеет преимущества, так как он находится в металлическом корпусе и электрически не связан со сварочным источником. Поэтому экранирование рентгеновского датчика не вызывает затруднений и сводится к экранированию токоподводящих и сигнальных проводов. Экранирование вторично-эмиссионного датчика вызывает затруднение, так как коллектор вторичных электронов крепится через изоляторы на корпусе электронно-лучевой пушки в открытом виде и электрически соединен с корпусом пушки через сопротивление. Речь может идти лишь об экранировании сигнального провода, что обычно производится при помощи коаксиального кабеля. Следует особо отметить необходимость экранировки от наводок со стороны отклоняющей системы. Наведение на сигнальный провод помехи, пропорциональной току сканирования, может привести к методической погрешности измерительного устройства положения стыка. Поэтому цепи сканирова-

ния и сигнальные провода датчика положения стыка необходимо проводить в отдельных кабелях.

Существенным источником помехи является нестабильность источника питания электронно-лучевой пушки. Эта нестабильность может привести к пульсациям тока электронного пучка и диаметра электронного пучка. Источниками такой нестабильности могут являться пульсации ускоряющего напряжения и пульсации напряжения, поступающего на ускоряющий электрод электронно-лучевой пушки. К стабильности ускоряющего напряжения предъявляются высокие требования. Нестабильность и пульсации не должны превышать 0,1 % от номинального значения. На практике такая стабильность ускоряющего напряжения, как правило, не достигается. Амплитуда и частота пульсаций зависит от используемой схемы выпрямителя и от того, применяется ли высоковольтная стабилизация напряжения. Амплитуда пульсаций ускоряющего напряжения достигает нескольких процентов. Частота пульсаций в зависимости от схемы выпрямителя составляет при 3-фазном выпрямлении 150 Гц, при 6-фазном выпрямлении – 300 Гц. Аналогичные пульсации могут иметь место и в схеме формирования управляющего напряжения электронно-лучевой пушки, и эти пульсации приводят к пульсациям тока электронного пучка. Амплитуда пульсаций тока электронного пучка может достигать 30 % при малых токах пучка и 5...10 % при больших токах пучка. Эти пульсации существенно искажают сигнал датчика положения стыка. Поэтому приходится применить различные способы устранения их влияния.

При использовании метода развертывающего преобразования время развертки электронного пучка поперек стыка обычно не превышает 1...2 мс. Это связано с тем, что вывод электронного пучка из сварочной ванны не должен приводить к заметному влиянию на процесс сварки. Эффективным способом устранения влияния пульсаций тока пучка на сигнал датчика стыка является синхронизация момента поискового зондирования с фазой питающей сети. Причем фаза выбирается таким образом, чтобы изменение тока электронного пучка в этот момент было минимальным.

При применении метода синхронного детектирования в сигнале датчика положения стыка при наличии пульсаций тока сварки образуются составляющие с боковыми частотами  $\omega_1 + \omega_n$  и  $\omega_1 - \omega_n$ , где  $\omega_1$  – несущая частота, а  $\omega_n$  – частота пульсаций. Полоса пропускания избирательного усилителя, настроенного в резонанс на частоте  $\omega_1$ , выбирается такой, чтобы подавить составляющие с боковыми частотами.

Для рентгеновского датчика характерна помеха, связанная с квантово-волновой природой излучения. Рентгеновский датчик состоит

из сцинтиллятора, преобразующего кванты рентгеновского излучения в эквивалентные по мощности световые вспышки, и фотоэлектронного преобразователя (ФЭУ), преобразующего световое излучение в электрический сигнал. На выходе фотоэлектронного умножителя имеет место серия коротких импульсов, амплитуда которых соответствует энергии квантов рентгеновского излучения. Количество квантов рентгеновского излучения и их величину можно получить, воспользовавшись формулой спектральной плотности интенсивности излучения (3.8) с учетом выражения

$$J_0 = \int_0^{\nu_0} J_\nu d\nu.$$

При этом необходимо учитывать, что энергия одного кванта в зависимости от частоты излучения  $\nu$  равна  $h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка.

Рассмотрим конкретный пример: требуется определить количество импульсов в 1 с с амплитудой, превышающей  $0,5\nu_0$ , при контроле излучения датчиком с размерами  $30 \times 30$  мм, расположенном на расстоянии 150 мм от источника излучения при ускоряющем напряжении  $U_0 = 60$  кВ, токе пучка  $I_n = 0,1$  А, материал мишени – алюминий.

Интенсивность излучения в указанном диапазоне частот запишется в виде

$$J_0 = \int_{0,5\nu_0}^{\nu_0} 0,341 \cdot 10^{-37} I_z(\nu_0 - \nu) d\nu = 1,16 \text{ Вт} = 1,16 \cdot 10^7 \text{ эрг/с}$$

при  $\nu_0 = 2,42 \cdot 10^{14} U_0 = 1,452 \cdot 10^{19}$ ;  $I = 0,1$  А;  $z = 14$ .

Средняя энергия одного кванта излучения в диапазоне частот  $0,5\nu_0 \dots \nu_0$  равна  $h\nu = 7,2 \cdot 10^{-8}$  эрг.

Количество квантов излучения в указанном диапазоне энергий в 1 с равно

$$n = \frac{J_0}{h\nu} = \frac{1,16 \cdot 10^7}{7,2 \cdot 10^{-8}} = 1,61 \cdot 10^{14}.$$

Количество квантов в 1 с, приходящих на рентгеновский датчик, в соответствии с выражением (3.9) равно

$$n_d = nK_1 = n \frac{\alpha\beta}{4\pi^2} = 1,63 \cdot 10^{11}$$

при  $\alpha = \beta = 30/150 = 0,2$ .

Если учесть, что время одного сканирования стыка пучком составляет 1 мс, то количество квантов излучения, приходящих на датчик за одно сканирование, равно  $1,63 \cdot 10^8$ , т. е. является большой величиной. Поэтому пульсации в выходном напряжении датчика из-за неравномерности распределения квантов излучения по времени не существенны.

Из рассмотренного примера следует, что для неколлимированного датчика помеха, связанная с квантовой природой рентгеновского излучения, не существенна и может не учитываться при анализе помехозащищенности измерительных устройств.

#### 4.5. Анализ помехоустойчивости измерительных устройств

При электронно-лучевой сварке возникает проблема надежности работы системы наведения электронного пучка на стык. Анализ работы различных устройств наведения на стык показывает, что в реальных условиях имеют место сбои, приводящие к грубым ошибкам в совмещении электронного пучка со стыком, которые обычно сопровождаются дефектами типа непровара. Естественно, что такие ошибки недопустимы и от системы слежения по стыку требуется достаточный уровень надежности ее работы в условиях действия помех. В данных условиях надежность зависит от способности системы противостоять вредному действию помех. Это свойство называют помехоустойчивостью, которая в основном определяется помехоустойчивостью измерительных устройств системы. Под помехоустойчивостью мы будем понимать способность измерительного устройства противостоять помехам, приводящим к грубым ошибкам. Такие ошибки возникают тогда, когда помеха принимается за полезный сигнал. Обычно такая ситуация возникает, когда помеха превышает некоторый пороговый уровень, принимаемый в измерительном устройстве для формирования сигнала отклонения стыка.

В качестве количественной оценки помехоустойчивости примем величину [162]

$$S = \lg \frac{1}{P_{\text{ош}}}, \quad (4.6)$$

где  $P_{\text{ош}}$  – вероятность ошибки.

Определенная такой формулой оценка помехоустойчивости выражается положительным числом, обычно в пределах десяти. Она позволяет произвести сравнительную оценку помехоустойчивости различных измерительных устройств.

#### 4.5.1. Анализ помехоустойчивости измерительного устройства, работающего по методу синхронного детектирования

Метод синхронного детектирования применяется для слежения по стыку при малом токе пучка. Его обычно используют для записи траектории стыка в системах с предварительным программированием траектории на малом токе и последующем воспроизведением траектории при сварке. Функциональная схема измерительного устройства, работающего по методу синхронного детектирования, изображена на рис. 2.16. Здесь координаты  $x_{ст}$  и  $x_{п}$  являются медленноменяющимися функциями времени. Помеха  $\eta$ , обусловленная неоднородностью обрабатываемой поверхности, также является медленноменяющейся функцией времени и поэтому не может быть отфильтрована фильтрами  $W_{\Sigma}(s)$  и  $W_{\Phi}(s)$ .

Помеха  $f$ , связанная с наводками на датчик и пульсациями тока электронного пучка, может быть отфильтрована избирательным усилителем  $W_{\mu}(s)$  и сглаживающим фильтром  $W_{\Phi}(s)$ . Несущая частота сканирования пучка  $\omega_1$  выбирается такой, чтобы уровень помех в этой части спектра был минимальным:  $\omega_1 \gg \omega_c, 3\omega_c, 5\omega_c$ .

Частота сканирования такой, чтобы она была значительно больше частоты питающей сети и возможных частот пульсаций. В этом случае помехи, обусловленные наводками и пульсациями тока пучка, могут быть отфильтрованы избирательным усилителем, обладающим необходимой для этого добротностью. Ограничение на добротность сверху накладывает условие пропускания без искажений полезного сигнала  $x_{ст}$  и  $x_{п}$ . Полоса пропускания избирательного усилителя должна быть не меньше максимальных частот изменения этих координат:

$$Q < Q_{\max} = \frac{\omega_1}{\Delta\omega},$$

где  $\omega_1$  – частота сканирования;  $\Delta\omega$  – полоса пропускания:  $\Delta\omega = 2\omega_{хст}$ , где  $\omega_{хст} = 0,4 \text{ с}^{-1}$  – максимальная частота изменения полезного сигнала.

Выберем  $\omega_1 \gg 2\pi \cdot 250$ :

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \cdot 3025 = 19\,000 \text{ с}^{-1}.$$

Тогда

$$Q_{\max} = \frac{19000}{0,8} = 23\,750.$$

Получить такую добротность можно только с применением



кварцевого фильтра. Поэтому будем исходить из соображений технической реализуемости. Реально достигаемая добротность избирательных фильтров на транзисторных каскадах составляет  $Q = 20 \dots 60$ . При  $Q = 40$  полоса пропускания  $\Delta\omega = 475$  или  $\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = 75$  Гц.

Смещение частоты относительно частоты настройки  $\omega_1$  на 38 Гц приводит к ослаблению амплитуды на уровень 0,7. Амплитудно-частотная характеристика одноконтурного избирательного усилителя описывается выражением [64]

$$\frac{K}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ Q \frac{2(f - f_1)}{f_1} \right]^2}}. \quad (4.7)$$

Расчет по формуле (4.7) при  $f - f_1 = 150$  Гц дает ослабление в 4 раза, при двухкаскадном усилителе – в 16 раз. При  $f - f_1 = 300$  Гц для однокаскадного усилителя ослабление изменится в 8 раз, для двухкаскадного усилителя – в 4 раза. Поэтому можно считать, что помехи, появляющиеся за счет модуляции полезного сигнала пульсацией тока пучка, сосредоточенные на боковых частотах  $\omega_1 \pm 3\omega_c$  и  $\omega_1 \pm 6\omega_c$ , будут подавлены двухкаскадным избирательным усилителем соответственно в 16 и 4 раза. А при использовании двухкаскадного избирательного усилителя с добротностью  $Q = 40$  помехи, отличающиеся по частоте от частоты настройки  $f_1$  более чем на  $0,1f_1$ , подавляются настолько, что их влиянием можно пренебречь. Поэтому при рассмотрении помехоустойчивости измерительного устройства, работающего по методу синхронного детектирования, можно принимать во внимание только помехи от неоднородности обрабатываемой поверхности.

При методе синхронного детектирования неоднородность обрабатываемой поверхности преобразуется в сигнал первой гармоники частоты сканирования точно так же, как и неоднородность в виде стыка сварного соединения. При токе электронного пучка  $I_n = 2$  мА для рентгеновского датчика были получены следующие отношения амплитуды сигнала от стыка к среднеквадратическому отклонению помехи:  $A/\sigma = 13,2$  при зазоре в стыке  $h_s = 0,3$  мм;  $A/\sigma = 4,4$  при зазоре в стыке  $h_s = 0,1$  мм.

Условие сбоя измерительного устройства запишем в виде  $\eta > A$ . В этом случае амплитуда помехи будет превышать амплитуду сигнала от стыка. Вероятность единичного сбоя запишется в виде [67]

$$P(|\eta| > A) = 1 - F(A) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^A e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Введя новую переменную  $t = \frac{x}{\sigma}$  и принимая  $m = 0$ , получим

$$P(|\eta| > A) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{A}{\sigma}}^{\frac{A}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 - \Phi^*(x),$$

где  $\Phi^*(x)$  – интеграл вероятности.

При больших значениях  $x$  удобно применить асимптотическое разложение функции  $\Phi^*(x)$ , сохранив только первый член разложения:

$$\Phi^*(x) \approx 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}x} e^{-\frac{x^2}{2}},$$

или

$$P(\eta > A) = 1 - \Phi^*(x) \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}x} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad (4.8)$$

где  $x = \frac{A}{\sigma}$ .

Расчеты по формуле (4.8) дают следующие результаты:

для рентгеновского датчика при  $hs = 0,3$  мм  $A/\sigma = 13,2$ ,  
 $P(\eta > A) = 4,4 \cdot 10^{-40}$ ; при  $hs = 0,1$  мм  $A/\sigma = 4,4$ ,  $P(\eta > A) = 5,67 \cdot 10^{-6}$ ;

для вторично-эмиссионного датчика при  $hs = 0,3$  мм  $A/\sigma = 14,4$ ,  
 $P(\eta > A) = 2,5 \cdot 10^{-47}$ ; при  $hs = 0,1$  мм  $A/\sigma = 4,8$ ,  $P(\eta > A) = 8,2 \cdot 10^{-7}$ .

Полученные результаты дают вероятность единичных сбоев. Для того чтобы определить вероятность всего процесса без сбоев, необходимо воспользоваться теоремой суммирования вероятностей некоторой последовательности измерений. Для этого необходимо получить характеристики одного измерения. Если разбить всю длину сварного шва на участки, равные одному измерению, то необходимо определить длину этого участка. Длина участка одного измерения будет равна диаметру электронного пучка. При малом токе электронного пучка его диаметр равен 0,4 мм. Тогда число единичных измерений на 1 м сварного шва составит 2500.

Вероятность сбоя при сварке шва длиной 1 м равна:  
 для рентгеновского датчика

$$P_{\text{ош}} = n \cdot P(\eta > A) = \begin{cases} 1,1 \cdot 10^{-36} & \text{при } h_s = 0,3 \text{ мм,} \\ 1,42 \cdot 10^{-2} & \text{при } h_s = 0,1 \text{ мм;} \end{cases}$$

для вторично-эмиссионного датчика

$$P_{\text{ош}} = n \cdot P(\eta > A) = \begin{cases} 6,25 \cdot 10^{-44} & \text{при } h_s = 0,3 \text{ мм,} \\ 2,05 \cdot 10^{-3} & \text{при } h_s = 0,1 \text{ мм.} \end{cases}$$

Величина помехоустойчивости рентгеновского датчика при  $h_s = 0,1$  мм

$$S = \lg \frac{1}{P_{\text{ош}}} = 1,85,$$

для вторично-эмиссионного датчика при  $h_s = 0,1$  мм

$$S = \lg \frac{1}{P_{\text{ош}}} = 2,69.$$

Из приведенных расчетов видно, что при зазоре в стыке  $h_s = 0,1$  мм вероятность сбоя при сварке шва длиной 1 м с использованием рентгеновского датчика составляет 1,42 %, а при использовании вторично-эмиссионного датчика – 0,2 %. Это указывает на довольно высокую надежность слежения по стыку при малом токе пучка. Хотя вероятность ошибки не велика, однако она возможна. Поэтому необходимо разработать методы повышения помехоустойчивости измерительных устройств. Повысить помехоустойчивость возможно путем уменьшения дисперсии помех, что достигается за счет осреднения результатов измерений вдоль линии стыка. Для этого вводится дополнительное сканирование по координате  $y$ , направленное вдоль стыка с частотой  $\omega_2 \gg \omega_1$ . Если выбрать длину участка сканирования, равную  $k d_n$ , то среднеквадратическое отклонение помехи будет снижено в  $\sqrt{k}$  раз. Выберем  $k = 16$  при диаметре пучка  $d_n = 0,4$  мм, длина участка сканирования составит 6,4 мм. Увеличение отношения  $A/\sigma$  в 4 раза приводит к тому, что вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$  становится ничтожно малой величиной. Так, при  $A/\sigma = 17,6$   $P(\eta > A) = 1,2 \cdot 10^{-69}$ .

Таким образом, введение дополнительного высокочастотного сканирования, направленного вдоль свариваемого стыка, позволяет существенно повысить помехоустойчивость измерительного устройства, работающего по методу синхронного детектирования. При использовании этого метода надо тщательно ориентировать отклоняющую систему для получения сканирования точно вдоль стыка. Кроме того,

надо следить за тем, чтобы дополнительное сканирование не привело к размыванию пучка поперек стыка, т. е. к увеличению его диаметра. Иначе эффект этого сканирования может быть существенно снижен.

#### 4.5.2. Анализ помехоустойчивости измерительного устройства, работающего по методу развертывающего преобразования

Развертывающее преобразование может быть использовано как в системах с предварительной записью траектории стыка на малом токе, так и в системах слежения по стыку на рабочем токе. Во втором варианте электронный пучок на короткое время выводится из сварочной ванны в направлении стыка, и осуществляется поисковое движение. По методу развертывающего преобразования работает большинство рассматриваемых в литературе устройств. Отличие заключается лишь в способах получения информации о смещении стыка. Наиболее характерным способом получения отклонения стыка является преобразование импульса стыка в прямоугольную форму и нахождение смещения импульса относительно центра развертки. Формирование прямоугольного импульса осуществляется пороговым устройством. От величины порогового напряжения зависит помехоустойчивость измерительного устройства. Сбой в работе измерительного устройства произойдет тогда, когда помеха превысит пороговый уровень или амплитуда импульса от стыка будет ниже порогового уровня.

В работе [150] дается выражение оптимального порогового уровня, при котором обеспечивается максимальная защищенность от помех:

$$\gamma = \frac{A}{2} + \frac{\sigma}{A} \ln 2n^2,$$

где  $A$  – математическое ожидание амплитуды импульса от стыка;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение помехи;  $n = \frac{T_3}{\tau_n}$ ;  $T_3$  – длительность цикла сканирования;  $\tau$  – длительность импульса от стыка. При  $n = 10$  эта формула дает следующие результаты:

$$\gamma = A \left( \frac{1}{2} + \frac{5,3\sigma}{A^2} \right). \quad (4.9)$$

Амплитуда  $A$  зависит от величины зазора в стыке. Значения порогового уровня  $\gamma$ , рассчитанные по формуле (4.9), сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Тип датчика	Рентгеновский						Вторично-эмиссионный					
	2		100		187		5		51		62	
$I_p, \text{мА}$	2		100		187		5		51		62	
$h_s, \text{мм}$	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
$\gamma/A$	0,50	0,53	0,50	0,58	0,53	0,78	0,51	0,61	0,55	0,77	0,69	0,9

Из таблицы видно, что оптимальный пороговый уровень лежит в пределах от 0,5 до 0,9  $A$  в зависимости от уровня помех в выходном сигнале датчика. Поскольку настройку порогового уровня под одну конкретную сварку нецелесообразно, то будем рассматривать случаи, когда ток электронного пучка изменяется в широком диапазоне при одном и том же зазоре в стыке. То есть будем задаваться максимальным значением  $\gamma$  для заданного зазора в стыке. Расчет вероятности одиночного сбоя от действия помех производится по формуле (4.8) при условии, что  $x = \frac{\gamma}{\sigma}$ . Результаты расчетов сведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Тип датчика	Рентгеновский					
	2		100		187	
$I_p, \text{мА}$	2		100		187	
$h_s, \text{мм}$	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
$\gamma/A$	0,53	0,78	0,53	0,78	0,53	0,78
$P(\eta > \gamma)$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$
$P_{\text{ош}}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	0,75	1	1	1	1
Тип датчика	Вторично-эмиссионный					
	5		51		62	
$I_p, \text{мА}$	5		51		62	
$h_s, \text{мм}$	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
$\gamma/A$	0,69	0,9	0,69	0,9	0,69	0,9
$P(\eta > \gamma)$	$9,3 \cdot 10^{-23}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,125	$8,7 \cdot 10^{-2}$	0,28
$P_{\text{ош}}$	$2,3 \cdot 10^{-15}$	0,13	1	1	1	1

*Примечание.* Здесь  $P_{\text{ош}} = nP(\eta > \gamma)$  – вероятность ошибки при сварке шва длиной 1 м.

Из расчетов следует, что метод развертывающего преобразования дает приемлемые результаты лишь при слежении на малом токе электронного пучка, хотя в этом случае уступает методу синхронного детектирования. При слежении по стыку на рабочем токе вероятность

сбоя равна единице. Это объясняет то обстоятельство, что системы слежения по стыку, работающие по методу развертывающего преобразования, не нашли промышленного применения, за исключением устройств наведения на стык, работающих при малом токе электронного пучка. Поэтому актуальной задачей является повышение помехоустойчивости за счет увеличения отношения  $A/\sigma$ . Увеличить это отношение возможно либо за счет увеличения амплитуды импульса  $A$ , которое достигается повышением коэффициента глубины модуляции, либо за счет уменьшения среднеквадратического отклонения помехи, достигаемого за счет применения специальных методов обработки информации.

Помехозащищенность измерительного устройства можно повысить, если совместить метод развертывающего преобразования с частотной селекцией информации, свойственной методу синхронного детектирования [27]. Для этой цели к развертке пучка поперек стыка добавляется высокочастотная составляющая, а в сигнале датчика выделяется вторая гармоника от частоты сканирования. В этом случае весь спектр информационного сигнала перемещается в область частоты второй гармоники, что позволяет избавиться от части помех, присущих методу развертывающего преобразования.

Другим эффективным методом уменьшения помех является метод накопления.

#### 4.5.3. Метод синхронного накопления

Метод синхронного накопления разработан для обнаружения очень слабого периодического сигнала. Суть метода заключается в том, что период следования сигнала разбивается на  $m$  равных частей и в каждой части сигнал контролируется и суммируется с сигналом в этой же части, контролируемым в предыдущем периоде. Такое суммирование продолжается  $n$  раз. Применительно к слежению за стыком при ЭЛС метод накопления реализуется следующим образом [33]. Траектория сканирования электронного пучка поперек стыка разбивается на  $m$  участков. В каждом из участков запускается аналого-цифровой преобразователь, и показания датчика преобразуются в цифровой код. Каждое показание датчика записывается в память микропроцессорного устройства и затем суммируется с другими данными соответствующего участка сканирования. Второй важной функцией, выполняемой микропроцессором, является нормирование показаний датчика. Для этого все суммируемые значения, соответствующие участкам траектории, делятся на максимальное суммированное значение, т. е. амплитуда импульса от стыка становится равной единице. Это делается для того, чтобы

пороговое значение, являющееся функцией амплитуды импульса от стыка, оставалось постоянной величиной, независимо от изменения тока пучка, величины зазора в стыке, диаметра пучка и других параметров процесса, влияющих на амплитуду импульса от стыка. Таким образом, в каждой точке траектории сканирования мы получаем среднее арифметическое значение величины из  $n$  опытов. Поскольку импульс стыка повторяется в каждом опыте, а помеха имеет случайный характер, то амплитуда импульса от стыка  $A$  остается неизменной, а среднеквадратическое значение помехи уменьшается в  $\sqrt{n}$  раз [153]. Если отношение сигнала к помехе при одиночном сканировании равно  $A/\sigma$ , то после получения  $n$  накоплений отношение сигнала к помехе будет равно  $A\sqrt{n}/\sigma$ . То есть выбирая количество накоплений  $n$ , можно получить существенное увеличение помехоустойчивости измерительного устройства.

Число накоплений  $n$  выбирают из следующих соображений. Время проведения одного сканирования обычно равно 0,1...1 мс. Увеличение времени сканирования может привести к дефектам сварного шва. На уменьшение времени сканирования накладывает ограничение быстродействие отклоняющей системы и датчика положения стыка. Сквозность импульсов сканирования обычно принимают равной 0,01...0,02, исходя из соображения расходования энергии пучка на поиск стыка 1...2 % от общей энергии пучка. Тогда период  $T$  лежит в пределах  $T = 5...100$  мс. Для того чтобы избавиться от помех, связанных с пульсациями источника питания, фазу сканирования связывают с фазой питающей сети 50 Гц. Отсюда принимается  $T = 20$  мс. За 1 с может быть произведено 50 сканирований. Число  $n$  накоплений сверху ограничивается из условий возможного отклонения стыка за время  $T_0 = nT$  и влияния периода квантования по времени  $T_0$  на устойчивость и динамические характеристики цифровой следящей системы.

Скорость сварки электронным пучком лежит в пределах от 5 до 30 мм/с. Используя выражение (4.2), можно оценить возможный диапазон уходов стыка:

$$x_{\text{ст}}(t) = b\omega_1 t,$$

где  $b = 2$  мм;  $\omega_1 = 0,004...0,4$  с<sup>-1</sup>

Если задаться максимальным уходом стыка  $x_{\text{ст}} = 0,06$  мм, то можно рассчитать интервал времени накопления  $T_0 = 0,08...8$  с. Верхняя граница числа накоплений в зависимости от формы сварного шва лежит в пределах  $n = 4...400$ . Такой широкий диапазон взят из условий максимального диапазона скоростей сварки. Реальные условия ЭЛС

показывают, что при максимальных уходах стыка, возникающих при сварке круговых швов малого диаметра, ЭЛС осуществляется не на максимальной, а на некоторой средней скорости  $V_{св} = 10...15$  мм/с. Тогда минимальную верхнюю границу числа накоплений  $n$  можно принять равной 16. Максимальная верхняя граница числа накоплений будет зависеть главным образом от условий устойчивости системы слежения. Система управления должна иметь возможность оперативного изменения числа накоплений.

Рассмотрим помехоустойчивость измерительных устройств с обработкой информации по методу накопления при  $n = 16$ . Результаты расчетов помехоустойчивости измерительных устройств, работающих по методу накопления при  $n = 16$ , сведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Тип датчика	Рентгеновский					
	2		100		187	
$I_{дл}$ , мА						
$hs$ , мм	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
$\gamma/A$	0,5	0,5	0,5	0,8	0,5	0,8
$P(\eta > \gamma)$	0	$4,2 \cdot 10^{-18}$	$1,3 \cdot 10^{-29}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0
$P_{ош}$	0	$1,4 \cdot 10^{-15}$	$4,3 \cdot 10^{-27}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	1	0
Тип датчика	Вторично-эмиссионный					
	5		51		62	
$I_{дл}$ , мА						
$hs$ , мм	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
$\gamma/A$	0,5	0,5	0,65	0,8	0,68	0,8
$P(\eta > \gamma)$	0	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$4,8 \cdot 10^{-14}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
$P_{ош}$	0	$8,3 \cdot 10^{-19}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1

*Примечание.* При расчете  $P_{ош}$  принималось во внимание выражение  $P_{ош} = kP(\eta > \gamma)$ , где  $k$  – количество измерений на 1 м шва, при  $n = 16$ ,  $k = 330$ .

Из полученных результатов следует, что измерительные устройства достаточно надежно функционируют при гарантированном зазоре в стыке  $hs = 0,3$  мм. При зазоре в стыке  $hs = 0,1$  мм вероятность сбоя велика. Обеспечить гарантированный зазор  $hs = 0,3$  мм возможно только с помощью специальной разделки кромок, требующей дополнительных затрат на механическую обработку. Кроме того, зазор в стыке приводит к занижению в верхней части сварного шва, что нежелательно. Поэтому необходимо повысить помехоустойчивость слежения при  $hs \leq 0,1$  мм. Дальнейшее повышение помехоустойчивости может быть связано с увеличением числа накоплений  $n$ . Однако это может привести



к значительному увеличению периода дискретности  $T_0 = nT$ . Так, при  $n = 64$   $T_0 = 1,3$  с. Дальнейшее увеличение  $n$  невозможно, так как трудно обеспечить устойчивость и хорошие динамические характеристики следящей системы. Поэтому целесообразно использовать другой путь, связанный с увеличением амплитуды импульса от стыка за счет увеличения коэффициента глубины модуляции. Этот способ реализуется с помощью коллимированного рентгеновского датчика стыка.

Из рис. 3.14 видно, что коэффициент глубины модуляции коллимированного рентгеновского датчика при угле коллиматора к стыку  $\beta = 10^\circ$  увеличивается в 3,5 раза по сравнению с неколлимированным датчиком. Таким образом, применение коллимированного датчика позволяет поднять отношение  $A/\sigma$  в 3,5 раза, что существенно скажется на помехоустойчивости измерительного устройства. Рассмотрим значения вероятности сбоя коллимированного рентгеновского датчика с обработкой сигнала методом накопления при числе накоплений  $n = 16$ . Результаты расчета помехоустойчивости коллимированного рентгеновского датчика сведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

$I_n$	2		100		187	
$hs, \text{ мм}$	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
$\gamma/A$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$P(\eta > \gamma)$	0	0	0	$\frac{7,1}{10^{40}}$	$\frac{9,3}{10^{76}}$	$\frac{2,3}{10^9}$
$P_{\text{ош}}$	0	0	0	$\frac{2,3}{10^{37}}$	$\frac{3,0}{10^{73}}$	$\frac{7,59}{10^7}$
$S = \lg \frac{1}{P_{\text{ош}}}$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	37,361	73,333	6,78

Из полученных результатов следует, что использование коллимированного рентгеновского датчика совместно с обработкой информации методом накопления позволяет обеспечить высокую помехоустойчивость измерительного устройства во всем диапазоне сварочных токов.

#### 4.6. Приведение помехи ко входу измерительного устройства

При экспериментальных исследованиях анализировались помехи на выходе датчиков контроля положения стыка в соответствии с функциональной схемой (рис. 4.1). Полученные экспериментальные данные

использовались для анализа помехоустойчивости измерительных устройств. Для оценки помехозащищенности следящей системы указанные помехи необходимо привести ко входу измерительного устройства с учетом тех преобразований, которые осуществляются в измерительном устройстве.

Сигнал на выходе датчика записывается в виде

$$S_d(t) = I(t) + \eta_1(t),$$

где  $I(t) = A \exp\left[-\frac{\varepsilon(t)^2}{2\sigma_n^2}\right]$  – сигнал от стыка;  $\eta_1$  – помеха на выходе датчика.

В качестве информационного параметра, характеризующего отклонение стыка, используется фаза сигнала

$$\varepsilon(t) = Vt - E_{см},$$

которая зависит от смещения стыка  $E_{см}$ .

Представим результат действия помехи как изменение информационного параметра  $\varepsilon$ :

$$S_d = A \exp\left[-\frac{(\varepsilon + \delta\varepsilon)^2}{2\sigma_n^2}\right],$$

где пульсация фазы  $\delta\varepsilon$  обусловлена действием помехи  $\eta_1(t)$ .

Если помеха  $\eta_1(t)$  мала, т. е.  $\eta_1 < A$ , то справедливо следующее соотношение:

$$\eta_1(t) = \frac{dS_d}{d\varepsilon} \delta\varepsilon.$$

Поскольку параметр  $\varepsilon$  имеет размерность отклонения электронного пучка от стыка, то  $\delta\varepsilon = \eta(t)$  – помеха приведенная ко входу измерительного устройства,

$$\eta_1(t) = \frac{dS_d}{d\varepsilon} \eta(t). \quad (4.10)$$

Для оценки параметра  $\frac{dS_d}{d\varepsilon}$  рассмотрим форму импульса от стыка в отсутствии помехи:

$$S_d = A \exp \left[ -\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_n^2} \right],$$

$$\frac{dS_d}{d\varepsilon} = -\frac{A\varepsilon}{\sigma_n^2} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_n^2}}$$

Из выражения (4.10) следует, что помеха  $\eta(t)$ , приведенная ко входу измерительного устройства, будет тем меньше, чем больше производная  $\frac{dS_d}{d\varepsilon}$ . Определим максимальное значение этой производной и величину  $\varepsilon$ , при которой следует производить измерение фазы импульса от стыка. Для этого определим вторую производную и приравняем ее к нулю:

$$\frac{d^2 S_d}{d\varepsilon^2} = \frac{A}{\sigma_n^2} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_n^2}} \left[ \frac{\varepsilon^2}{\sigma_n^2} - 1 \right] = 0,$$

отсюда  $\varepsilon = \pm \sigma_n$ . Тогда

$$\left. \frac{dS_d}{d\varepsilon} \right|_{\max} = 0,606 \frac{A}{\sigma_n}.$$

Подставляя полученный результат в выражение (4.10), имеем

$$\eta(t) = \frac{\sigma_n}{0,606A} \eta_1(t). \quad (4.11)$$

Из этого выражения следует, что помехозащищенность измерительного устройства тем выше, чем больше амплитуда импульса от стыка  $A$  и меньше радиус пучка  $\sigma_n$ . Оптимальное значение порогового уровня, при котором следует измерять фазу импульса от стыка, равно  $0,606A$ . При этом помеха приводит к минимальному изменению фазы импульса от стыка.

Уравнение (4.11) может быть использовано для получения характеристик случайного процесса.

Для среднеквадратического отклонения

$$\sigma_\eta = \frac{\sigma_n}{0,606A} \sigma_{\eta_1}.$$

Для дисперсии помехи

$$D_{\eta} = \left[ \frac{\sigma_{\eta}}{0,606A} \right]^2 D_{\eta 1}.$$

Функциональная схема (рис. 4.1) может быть преобразована к виду, изображенному на рис. 4.24. Здесь  $\eta$  – суммарная помеха, приведенная ко входу измерительного устройства, имеющая размерность линейного отклонения электронного пучка от стыка сварного соединения. Зная характеристики помехи, такие как корреляционная функция, спектральная плотность, можно рассчитать погрешность слежения от действия помех, а также произвести синтез оптимальной по помехозащищенности следящей системы.

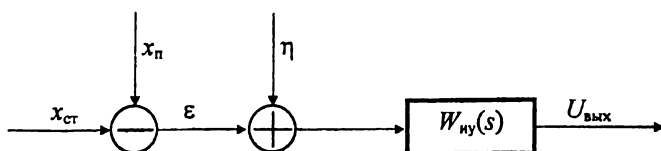


Рис. 4.24. Функциональная схема измерительного устройства

## Глава 5

### СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПО СЕЧЕНИЮ ПУЧКА

Плотность распределения энергии по сечению пучка является важным технологическим параметром процесса ЭЛС. Анализ состояния вопроса по литературным источникам показывает, что существующие методы не позволяют осуществлять контроль геометрии электронного пучка непосредственно в зоне сварки, что существенно сужает область применения этих методов.

В данной главе изложен бесконтактный метод контроля плотности распределения энергии по сечению электронного пучка, основанный на использовании рентгеновского излучения из зоны обработки.

#### 5.1. Математическая модель рентгеновского датчика для контроля плотности распределения энергии по сечению пучка

Способ контроля плотности распределения энергии по сечению пучка с использованием рентгеновского датчика основан на том, что плотность рентгеновского излучения из зоны взаимодействия электронного пучка с поверхностью обрабатываемого материала пропорциональна плотности тока электронного пучка. То есть плотность энергии рентгеновского излучения совпадает с плотностью энергии электронного пучка, если поверхность обрабатываемого изделия в зоне контроля однородна. Для того чтобы зона обзора рентгеновского датчика была намного меньше диаметра электронного пучка, применяют коллимированный рентгеновский датчик. Если зона обзора рентгеновского датчика имеет форму узкой полосы и она пересекается электронным пучком, то с рентгеновского датчика будет сниматься зондовая характеристика, подобная той, которая получается при пересечении электронного пучка проволочным зондом.

На рис. 5.1 изображена схема рентгеновского датчика для контроля геометрии электронного пучка. Датчик содержит рентгеновский датчик и коллиматор, представляющий защитный экран с коллимационным отверстием. Экран выполнен из материала, поглощающего рентгеновское излучение. Рентгеновское излучение попадает на датчик только через коллимационное отверстие, выполненное в виде щели шириной 0,05 мм. Зона обзора коллимированного датчика описывается функцией  $\varphi(x)$ .

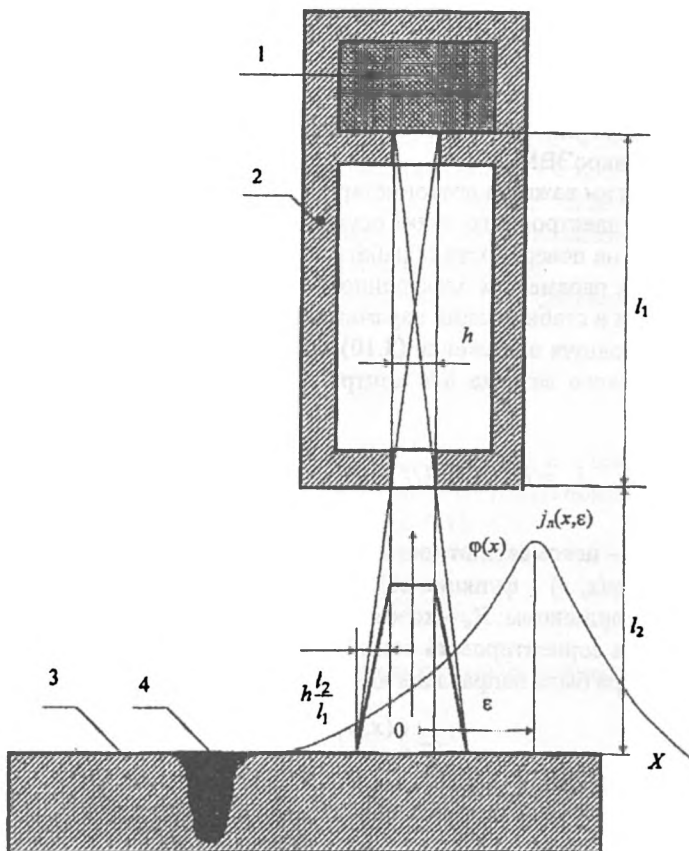


Рис. 5.1. Функциональная схема рентгеновского датчика:  
 1 – рентгеновский датчик; 2 – коллиматор; 3 – обрабатываемая  
 деталь; 4 – сварочная ванна

Во время зондирования электронный пучок с помощью отклоняющей системы выводится из сварочной ванны и сканируется по поверхности обрабатываемого изделия до пересечения зоны обзора датчика. Путь сканирования разбивается на  $n$  равных участков. На каждом участке осуществляется измерение интенсивности рентгеновского излучения. По полученным измерениям строится зависимость интенсивности рентгеновского излучения от величины перемещения пучка. Эта зависимость является зондовой характеристикой плотности распределения энергии пучка по одной из координат его сечения.

Достоинством предлагаемого способа контроля является его бесконтактность. Отсутствие зонда или коллектора, подвергающихся воздействию электронного пучка, приводит к повышению долговечности датчика. Кроме того, рентгеновский датчик гальванически развязан от источника питания электронно-лучевой пушки, что важно при его работе с микроЭВМ.

Другим важным достоинством способа является то, что контроль геометрии электронного пучка осуществляется непосредственно в зоне обработки на поверхности обрабатываемого изделия при любых технологических параметрах электронного пучка. При этом решается задача управления и стабилизации параметров сварочного шва.

Используя выражение (3.10), можно получить сигнал на выходе рентгеновского датчика для контроля плотности распределения энергии в виде

$$J_d = K_0 K_1 Z I_n U_0^2 \frac{1}{K_n} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, y) j_n(x, y) dx dy,$$

где  $j_n(x, y)$  – искомая плотность распределения тока пучка по координатам  $x$  и  $y$ ;  $\varphi(x, y)$  – функция обзора коллимированного датчика по указанным координатам;  $K_n$  – коэффициент нормализации.

Если сориентировать оси координат таким образом, чтобы щель коллиматора была направлена вдоль оси  $OY$  тогда

$$\varphi(x, y) = \varphi(x).$$

Предположим, что плотность распределения тока

$$j_n(x, y) = j_n(x) j_n(y),$$

тогда с учетом того, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} j_n(y) dy = 1,$$

получим

$$J_d(\epsilon) = K_0 K_1 Z I_n U_0^2 \frac{1}{K_n} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) j_n(x, \epsilon) dx. \quad (5.1)$$

Выражение (5.1) устанавливает связь между сигналом датчика и плотностью распределения тока по сечению пучка. Если зона обзора коллимированного датчика настолько мала, что можно представить

$$\frac{1}{K_n} \varphi(x) = \delta(\Delta),$$

где  $\delta(0)$  – дельта-функция, тогда выражение (5.1) примет вид

$$J_d(\epsilon) = K_0 K_1 Z I_n U_0^2 j_n(\epsilon).$$

Сигнал, снимаемый с рентгеновского датчика, в этом случае с точностью до постоянного коэффициента совпадает с плотностью распределения тока пучка по координате  $X$ . Если же такая идеализация неправомерна, то зондовая характеристика  $J_d(\epsilon)$  описывает плотность распределения тока  $J_n(\epsilon)$  с некоторой погрешностью.

Рассмотрим составляющие формулы (5.1). В соответствии с (3.9)

$$K_1 = \frac{\alpha \cdot \beta}{4\pi} = \frac{d \cdot h}{4\pi(l_1 + l_2)^2},$$

где  $d$  – диаметр кристалла рентгеновского датчика;  $h$  – ширина коллимационного отверстия;  $(l_1 + l_2)$  – расстояние от рентгеновского датчика до обрабатываемой поверхности (см. рис. 5.1).

Ранее получено значение коэффициента  $K_0, B^{-1}$ :

$$K_0 = 1 \cdot 10^{-9}$$

Из рис. 5.1 видно, что  $\varphi(x)$  представляет собой кусочно-линейную функцию:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } -\frac{h}{2} \leq x \leq \frac{h}{2}, \\ 1 + \frac{1}{2} \frac{l_1}{l_2} - \frac{1}{h} \frac{l_1}{l_2} x & \text{при } \frac{h}{2} < x \leq \frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h, \\ 1 + \frac{1}{2} \frac{l_1}{l_2} + \frac{1}{h} \frac{l_1}{l_2} x & \text{при } -\frac{h}{2} - \frac{l_2}{l_1} h \leq x < -\frac{h}{2}, \\ 0 & \text{при } |x| > \frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h. \end{cases}$$

Коэффициент нормализации  $K_n = \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)$ . Подставляя полученные значения в выражение (5.1), получим формулу для расчета зондовой характеристики рентгеновского датчика:



$$\begin{aligned}
J_{\text{д}}(\varepsilon) = 1 \cdot 10^{-8} \frac{d \cdot h}{4\pi(l_1 + l_2)^2} ZI_{\text{п}} U_0^2 & \left\{ \frac{1}{h \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^{-\frac{h}{2}}} \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} j_{\text{п}}(x, \varepsilon) dx + \right. \\
& + \frac{1}{h \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^{\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h}} \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{l_1}{l_2} - \frac{1}{h} \frac{l_1}{l_2} x\right) j_{\text{п}}(x, \varepsilon) dx + \\
& \left. + \frac{1}{h \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^{-\left(\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h\right)}} \int_{-\frac{h}{2}}^{-\left(\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h\right)} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{l_1}{l_2} + \frac{1}{h} \frac{l_1}{l_2} x\right) j_{\text{п}}(x, \varepsilon) dx \right\}. \quad (5.2)
\end{aligned}$$

Здесь выражение в фигурных скобках является оценкой нормированной плотности распределения тока по координате  $X$   $j^*(\varepsilon) \approx j(\varepsilon)$ ,

при этом  $\int_{-\infty}^{\infty} j(\varepsilon) d\varepsilon = 1$ .

С учетом этого выражения (5.2) запишется в виде

$$J_{\text{д}} = 1 \cdot 10^{-8} \frac{d \cdot h}{4\pi(l_1 + l_2)} ZI_{\text{п}} U_0^2 j^*(\varepsilon). \quad (5.3)$$

Для того чтобы оценка плотности распределения тока  $J^*(\varepsilon)$  была более точной, необходимо уменьшать ширину коллимационного отверстия, но при этом, как следует из формулы (5.3), будет уменьшаться и коэффициент усиления датчика за счет уменьшения площади кристалла. Поэтому величину  $h$  следует выбирать из условий получения необходимой амплитуды импульса и помехи, связанной с квантово-дискретным характером рентгеновского излучения.

Для того чтобы оценить погрешность зондовой характеристики, необходимо задать выражение  $J_{\text{д}}(x, \varepsilon)$ .

Обычно плотность распределения тока пучка по его сечению задается нормальным законом распределения. Для этого случая имеем

$$\begin{aligned}
 j^*(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \frac{1}{h \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)} & \left\{ \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} l \frac{-(x-\varepsilon)^2}{2\sigma_n^2} dx + \right. \\
 + \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h} \left( 1 + \frac{l_1}{2l_2} - \frac{1}{h} \frac{l_1}{l_2} x \right) l & \frac{-(x-\varepsilon)^2}{2\sigma_n^2} dx + \\
 + \int_{-\left(\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h\right)}^{-\frac{h}{2}} \left( 1 + \frac{l_1}{2l_2} + \frac{1}{h} \frac{l_1}{l_2} x \right) l & \left. \frac{-(x-\varepsilon)^2}{2\sigma_n^2} dx \right\}. \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Количественной оценкой плотности распределения энергии по сечению пучка является его эффективный диаметр.

Введем понятие эффективного диаметра. Для этого представим зондовую характеристику пучка в виде прямоугольника с плотностью тока, равной максимальной плотности тока в реальном пучке. Тогда выражение эффективного диаметра запишется в виде

$$d^* = \frac{1}{j_{\max}^*} \int_{-\infty}^{\infty} j^*(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (5.5)$$

Эффективный диаметр для нормального нормированного распределения равен

$$d = \frac{1}{j_{\max}} = \sigma_n \sqrt{2\pi}. \quad (5.6)$$

Эффективный диаметр  $d^*$ , рассчитанный по зондовой характеристике, отличается от истинного эффективного диаметра  $d$  на величину погрешности

$$\Delta = d^* - d.$$

Эта погрешность зависит от ширины коллимационного отверстия и от точности вычисления интегралов.

На рис. 5.2 изображены зондовые характеристики, рассчитанные по формуле (5.4) для различных значений  $\sigma_n$ . При расчете приняты следующие значения параметров:  $h = 0,05$  мм;  $l_1 = l_2$ .

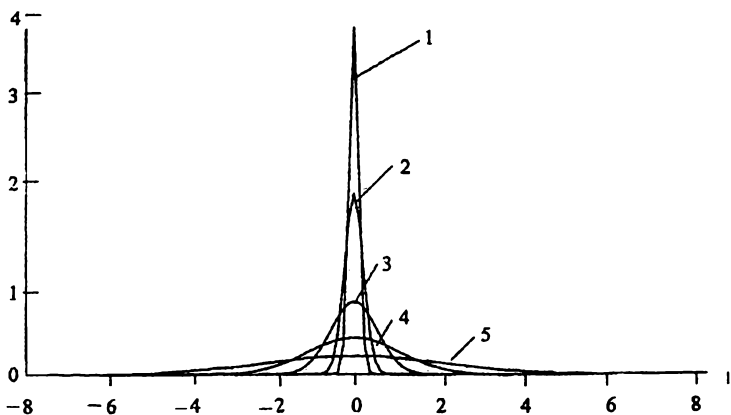


Рис. 5.2. Зондовые характеристики: 1 –  $\sigma = 0,1$  мм; 2 –  $\sigma = 0,2$  мм; 3 –  $\sigma = 0,5$  мм; 4 –  $\sigma = 1$  мм; 5 –  $\sigma = 2$  мм

Для расчета интегралов в реальном масштабе времени траектория сканирования пучка длиной 15 мм разбита на 128 равных отрезков и интегралы представлены в виде ступенчатой функции из 128 отрезков. Численные значения  $d^*$ ,  $d$  и  $\Delta$  для различных значений  $\sigma_n$  представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ п/п	$\sigma_n$ , мм	$d^*$ , мм	$d$ , мм	$\Delta$ , мм	$\Delta_{\text{отн}}$ , %	$\Delta^{(1)}_{\text{отн}}$ , %	$\Delta^{(2)}_{\text{отн}}$ , %
1	0,05	0,151	0,125	0,0264	21,1	1,11	0,21
2	0,08	0,216	0,200	0,0161	8,07	0,60	0,2
3	0,1	0,263	0,250	0,0129	5,18	0,45	0,07
4	0,2	0,507	0,501	$6,52 \cdot 10^{-3}$	1,3	0,16	0,08
5	0,4	1,003	1,000	$3,27 \cdot 10^{-3}$	0,326	0,04	0,03
6	1	2,501	2,5	$1,33 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,01	0,01
7	1,5	3,761	3,76	$9,1 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,00	0,00
8	2	5,010	5,010	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,004	0,00	0,00
9	2,5	6,250	6,250	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,000	0,00	0,00

Примечание. Здесь  $\Delta_{\text{отн}}$  – относительная погрешность, рассчитанная по формуле  $\Delta_{\text{отн}} = \frac{d^* - d}{d} 100\%$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  – телесные углы из зоны излучения на коллимационное отверстие у кристалла рентгеновского датчика;  $\Delta t$  – время контроля диаметра пучка.

Из расчетов (табл. 5.1) видно, что при малых  $\sigma_n$  методическая погрешность велика. Она имеет вполне определенную зависимость от диаметра пучка, поэтому может быть рассчитана поправка, уточняющая диаметр пучка. На ЭВМ с помощью программы интерполяции DIPLEX получены следующие выражения для расчета эффективного диаметра электронного пучка:

$$d_0^{(1)} = d_* - \frac{0,3715 \cdot 10^{-2}}{d_*}, \quad (5.7)$$

$$d_0^{(2)} = d_* - \frac{0,2745 \cdot 10^{-2}}{d_*} - \frac{0,1816 \cdot 10^{-3}}{d_*^2}, \quad (5.8)$$

где  $d_*$  – величина, рассчитанная по формуле (5.5).

Формулы (5.7) и (5.8) для расчета эффективного диаметра достаточно просты и пригодны для проведения расчетов микропроцессорными средствами.

Погрешности расчетов эффективного диаметра в этом случае имеют вид:

$$\Delta^{(1)} = d_0^{(1)} - d,$$

$$\Delta^{(2)} = d_0^{(2)} - d.$$

Относительные методические ошибки при расчете эффективного диаметра по формулам (5.7) и (5.8) приведены в табл. 5.1. Отсюда видно, что методическая ошибка при расчете эффективного диаметра по формуле (5.7) не превышает 1,1 %, а при расчете по формуле (5.8) не превышает 0,2 % от контролируемой величины. Причем максимальная погрешность имеет место при контроле электронных пучков малого диаметра. Поэтому можно считать, что используемая для контроля геометрических параметров электронного пучка методика обеспечивает вполне приемлемые методические погрешности. Значительно большие погрешности могут возникнуть из-за влияния помех и ограниченности разрядов АЦП.

Для коллимированного рентгеновского датчика наиболее существенной является помеха из-за квантово-дискретной природы рентгеновского излучения. В разд. 3.5 произведен расчет числа квантов рентгеновского излучения в диапазоне частот от  $0,5 \nu_0$  до  $\nu_0$  для следующих параметров процесса:  $U_0 = 60$  кВ;  $I = 0,1$  А, материал обрабатываемой мишени – алюминий. Число квантов рентгеновского излучения в 1 с для указанного случая  $n = 1,61 \cdot 10^{14}$ .

В соответствии с выражением (2.40) число квантов рентгеновского излучения, попадающих на коллимированный рентгеновский датчик за время контроля диаметра, равно

$$n_d = n \frac{\alpha \cdot \beta}{4\pi^2} \Delta t. \quad (5.9)$$

При величине коллимационного отверстия  $30 \times 0,05$  мм, расстоянии от кристалла до обрабатываемой поверхности 150 мм, длительности развертки пучка 0,1 мс, длине развертки 15 мм, ширине зоны обзора на обрабатываемой поверхности 0,1 мм расчет по формуле (5.9) дает

$$n_d = 1,61 \cdot 10^{14} \frac{0,2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-4}}{4\pi^2} 6,7 \cdot 10^{-7} = 180.$$

При указанных параметрах процесса и расположении коллимированного датчика 1/4 часть площади зондовой характеристики формируется за счет высокоэнергетических импульсов, снимаемых с выхода фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), преобразующего световые вспышки сцинтилляционного кристалла, пропорциональные рентгеновским квантам с энергией в диапазоне  $0,5h\nu_0 \dots h\nu_0$ . Остальные 3/4 площади зондовой характеристики формируется большим количеством малоэнергетических квантов в диапазоне энергий  $0 \dots 0,5h\nu_0$ . Будем считать, что пульсации в выходном сигнале датчика возникают из-за малого количества высокоэнергетических квантов, которые распределены по зондовой характеристике в соответствии с плотностью распределения тока по сечению электронного пучка. В рассмотренном случае количество таких квантов  $n = 180$ , и их распределение по зондовой характеристике осуществляется в соответствии с нормальным законом распределения.

Нас интересует расстояние между соседними импульсами на зондовой характеристике. Минимальное расстояние между импульсами будет соответствовать вершине зондовой характеристики, когда плотность импульсов максимальна. Минимальное расстояние между импульсами можно получить, если воспользоваться выражением для эффективного диаметра (5.5). В этом случае плотность распределения заменяется эквивалентным по площади прямоугольником:

$$\Delta_{\min} = \frac{d_d}{n_d}. \quad (5.10)$$

Расстояние между импульсами в любой другой точке зондовой характеристики может быть рассчитано по уравнению

$$\Delta(x) = \Delta_{\min} e^{\frac{x^2}{2\sigma_n^2}}, \quad (5.11)$$

с учетом (5.10) и (5.6) получим

$$\Delta(x) = \frac{\sigma_n \sqrt{2\pi}}{n_d} e^{\frac{x^2}{2\sigma_n^2}}, \quad (5.12)$$

временной интервал между соседними импульсами определится выражением

$$\Delta t = \frac{\Delta(x)}{V_{c.п}}, \quad (5.13)$$

где  $V_{c.п}$  – скорость перемещения пучка в процессе сканирования.

Каждый квант излучения может быть представлен в виде  $\delta$ -функции с площадью, равной его энергии. В рассмотренном случае средняя энергия кванта равна  $h\nu = 7,2 \cdot 10^{-8}$  эрг.

Поскольку импульсы, снимаемые с выхода рентгеновского датчика, имеют очень малую длительность для формирования зондовой характеристики, на выходе датчика ставят фильтр нижних частот (ФНЧ). Полоса пропускания ФНЧ должна захватывать спектр сигнала зондовой характеристики. На рис. 4.20 изображена нормированная плотность сигнала, имеющего форму нормального закона, которая получена при сканировании с длительностью 1 мс. Согласно этой характеристике максимальная частота спектра при диаметре пучка 0,2 мм составляет 20 кГц.

При продолжительности сканирования 0,1 мс максимальная частота спектра составит 200 кГц. Постоянная времени ФНЧ должна быть не более

$$T \leq \frac{1}{2\pi f_{\max}}.$$

При выполнении этого условия ФНЧ не вносит искажений в зондовую характеристику. При длительности сканирования 0,1 мс  $T \leq 0,76$  мкс.

Фильтр нижних частот, выполненный в виде апериодического звена первого порядка, имеет передаточную функцию вида

$$W_{\text{фич}}(s) = \frac{1}{Ts + 1}.$$

Реакция ФНЧ на одиночный импульс  $\delta(0)$  представляет собой импульсную переходную характеристику в виде экспоненциальной функции

$$k(t) = hv \cdot L^{-1}\{W_{\text{фич}}(s)\} = \frac{hv}{T} e^{-\frac{t}{T}}$$

В том случае когда действует серия импульсов, выходной сигнал с датчика имеет вид

$$Y(\bar{t}) = \sum_{m=0}^{\bar{t}} \delta(m) k(\bar{t} - m), \quad (5.14)$$

где  $\bar{t} = \frac{t}{\Delta t}$ , а величина  $\Delta t$  рассчитывается по формуле (5.13). Если подставить  $\bar{t} = n + \varepsilon$ , то выходной сигнал записывается в виде решетчатой функции

$$Y(n, \varepsilon) = \sum_{m=0}^n \delta(m) k[n - m, \varepsilon]. \quad (5.15)$$

Нас интересует уровень пульсаций в выходном сигнале. Амплитуда пульсаций определяется как половина его размаха:

$$A = \frac{1}{2} \{Y[n, 0] - Y[n - 1, 0]\} = \frac{1}{2} \frac{hv}{T}.$$

Относительный уровень пульсаций определяется выражением

$$\begin{aligned} A_{\text{отн}} &= \frac{1}{8} \frac{Y[n, 0] - Y[n - 1, 0]}{Y[n - 1, 0]} = \frac{1}{8} \frac{hv}{T} \frac{1}{Y[n - 1, 0]} = \\ &= \frac{1}{8} \frac{1}{\sum_{m=0}^{n-1} \delta(m) e^{-\frac{\Delta t}{T}(n-m)}}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

В выражении (5.16) учитывается то обстоятельство, что высокоэнергетическими импульсами формируется 1/4 амплитуды зондовой характеристики. Для того чтобы определить пульсации в установившемся режиме, необходимо выбрать  $n$  из выражения

$$\Delta t \cdot n = 4T,$$

или

$$n = \frac{4T}{\Delta t}. \quad (5.17)$$

В этом случае погрешность расчета пульсаций не превышает 8 %.

Для рассмотренного случая интервал времени между соседними импульсами при диаметре пучка  $d_n = 0,2$  мм  $\Delta t = 0,73 \cdot 10^{-8}$  с, а при диаметре пучка  $d_n = 2,5$  мм  $\Delta t = 9,3 \cdot 10^{-8}$  с.

Очевидно, что амплитуда пульсаций при  $d_n = 2,5$  мм будет больше, чем при  $d_n = 0,2$  мм. Расчет по формулам (5.16) и (5.17) при  $d_n = 2,5$  мм дает значение  $A_{отн} = 0,016 = 1,6$  % от амплитуды зондовой характеристики. Амплитуда пульсаций при  $d_n = 0,2$  мм будет на порядок меньше.

Следует заметить, что расчеты проводились при токе пучка  $I_n = 100$  мА. Настройка электронного пучка на стык и его фокусировка на поверхности обрабатываемого изделия производится при токе пучка  $I_n = 2 \dots 5$  мА. В этом случае интенсивность рентгеновского излучения снижается пропорционально току пучка в 50...20 раз и количество высокоэнергетических квантов излучения, распределенных по зондовой характеристике, снижается со 180 до 3...9. Вместе со снижением интенсивности излучения уменьшается амплитуда выходного сигнала рентгеновского датчика, а амплитуда пульсаций может достигать 25 % от амплитуды сигнала. В этом случае зондовая характеристика снимается с большими искажениями. Можно повысить точность зондовой характеристики, если использовать метод накопления, но для этого понадобится значительное время. Поэтому снижение пульсаций можно получить за счет увеличения времени сканирования, при этом пропорционально увеличивается амплитуда сигнала датчика. Время сканирования ограничивается условиями сварки. Время вывода пучка из зоны сварки не должно превышать 1 мс, исходя из условий стабильного формирования сварочного шва. Для уменьшения влияния помех, связанных с пульсациями тока сварки, фазу сканирования связывают с фазой питающей сети, т. е. осуществляют периодическое сканирование с частотой питающей сети. При времени сканирования 1 мс и частоте сканирования 50 Гц его скважность равна 0,05. В этом случае 5 % мощности электронного пучка расходуется на процесс контроля. Это довольно высокий уровень затрат. Поэтому целесообразно снизить время сканирования до 0,5 мс. На процесс контроля в этом случае будет затрачиваться 2,5 % энергии электронного пучка.

Рассчитаем уровень пульсаций при длительности сканирования 0,5 мс. При токе пучка  $I = 100$  мА количество квантов высокоэнергети-



ческого излучения, формирующих зондовую характеристику, в соответствии с формулой (5.9)

$$n_d = 1,61 \cdot 10^{14} \frac{0,2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-4}}{4\pi^2} 3,3 \cdot 10^{-6} = 900.$$

Временной интервал между соседними импульсами, рассчитанный по формулам (5.13) и (5.10), равен:

$$\text{при } d_n = 0,2 \text{ мм } \Delta t = 0,73 \cdot 10^{-8} \text{ с};$$

$$\text{при } d_n = 2,5 \text{ мм } \Delta t = 9,3 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

Следует заметить, что временные интервалы не изменились, так как мощность излучения осталась прежней. Постоянная времени фильтра нижних частот рассчитывается по формуле

$$T \leq \frac{1}{2\pi f_{\max}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Расчет по формулам (5.16) и (5.17) показывает, что амплитуда пульсаций при  $d_n = 2,5$  мм уменьшилась в 5 раз и составляет  $A_{\text{отн}} = 0,003 = 0,3$  %. При диаметре пучка  $d_n = 0,2$  мм амплитуда пульсаций будет на порядок меньше.

Найдем теперь амплитуду пульсаций при токе пучка  $I_n = 5$  мА и диаметре пучка  $d_n = 2,5$  мм:

$$\Delta t = 1,86 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$A_{\text{отн}} = 0,0794 \approx 8 \text{ \%}.$$

Из приведенных расчетов следует, что при токе пучка  $I_n = 5$  мА и диаметре пучка  $d_n = 2,5$  мм амплитуда пульсаций составляет 8 % от амплитуды зондовой характеристики. Амплитуда пульсаций может быть снижена в 4 раза, если использовать метод накоплений при числе накоплений  $n$ , равном 16.

Следует заметить, что наиболее неблагоприятные условия по амплитуде пульсаций возникают в случае контроля большого диаметра пучка при малой мощности. Такие условия на практике не возникают, поскольку диаметр сфокусированного электронного пучка малой мощности, как правило, меньше 1 мм. Поэтому можно утверждать, что при использовании метода накоплений с числом накоплений  $n = 16$  во всем диапазоне токов пучка амплитуда пульсаций не превышает 1 % от амплитуды зондовой характеристики, а при контроле на рабочих токах значительно меньше 1 %, что особенно важно для управления и стабилизации параметров электронного пучка в процессе сварки.

Для контроля сигнала рентгеновского датчика, запоминания информации и дальнейшей обработки используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Число разрядов АЦП выбирают равным числу разрядов микропроцессорной системы. При использовании 8-разрядных микропроцессоров целесообразно применять 8-разрядный АЦП. АЦП производит квантование информации по уровню. При 8-разрядном АЦП число таких уровней 256. Квантование по уровню приводит к погрешности, которая равна величине младшего разряда АЦП. Если перед АЦП стоит усилительный элемент с автоматической регулировкой усиления (АРУ), обеспечивающий постоянство амплитуды выходного сигнала, равной диапазону преобразования АЦП, то погрешность квантования по уровню равна  $A/2^n$ , где  $A$  – амплитуда зондовой характеристики;  $n$  – число разрядов АЦП. При  $n = 8$  погрешность квантования по уровню равна 0,4 % от амплитуды.

Из проведенного анализа следует, что все три вида погрешностей: погрешность метода, погрешность от действия помех и погрешность квантования – являются независимыми и можно определить общую среднеквадратическую погрешность. Расчеты показывают, что достижимая точность контроля диаметра пучка составляет 1 % при малых токах электронного пучка и 0,6 % на рабочих токах электронного пучка, что вполне приемлемо для контроля и стабилизации.

Диаметр электронного пучка является важной, но не единственной характеристикой плотности распределения энергии пучка по его сечению. В процессе эксплуатации электронно-лучевой пушки происходит износ или поломка катода, что отражается на характере кривой распределения. По виду кривой распределения можно диагностировать эмиссионную систему. При идеальной эмиссионной системе плотность распределения соответствует нормальному закону. Поэтому отклонение от нормального закона можно рассматривать как погрешность кривой распределения. В качестве критерия отклонения целесообразно применять квадратичный интегральный критерий вида

$$E = \sum_{n=-m}^m \left[ f[n] - e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta n}{\sigma_n} \right)^2} \right]^2 \quad (5.18)$$

где  $f[n]$  – зондовая характеристика в дискретных точках сканирования, центрированная по  $n$  и нормированная по амплитуде  $f[0] = 1$ ;  $\Delta$  – цена одного дискрета перемещения пучка;  $\delta_n$  – расчетное среднеквадратическое отклонение, определяемое по формуле (5.6).

Количественное значение квадратичного интегрального критерия (5.18) является оценкой соответствия зондовой характеристики нормальному закону распределения и может быть использовано при диагностике состояния электронно-лучевой пушки.

## 5.2. Способы фокусировки электронного пучка

Фокусировка электронного пучка – это совмещение фокальной плоскости с поверхностью обрабатываемого изделия за счет регулировки тока фокусирующей линзы. При фокусировке достигается минимальный диаметр электронного пучка на поверхности обрабатываемого изделия. Технологическая операция фокусировки проводится перед сваркой на малом токе электронного пучка. Если расстояние до обрабатываемой поверхности в процессе сварки не изменяется, то дополнительная подфокусировка не требуется. Повышение точности фокусировки достигается за счет применения устройств контроля острого фокуса.

Один из способов контроля острой фокусировки по методу синхронного детектирования заключается в контроле амплитуды второй гармоники на выходе вторично-эмиссионного или рентгеновского датчика стыка либо рентгеновского коллимированного датчика (рис. 2.15). Максимальное значение второй гармоники соответствует минимальному диаметру пучка на поверхности обрабатываемого изделия. Следует заметить, что значение минимального диаметра пучка при этом не контролируется. Фокусировку пучка в этом случае осуществляет оператор.

Для автоматизации процесса фокусировки можно использовать гармонические составляющие  $b_{mn}$  (рис. 2.14) с частотами  $2\omega_1 \pm \omega_2$ , где  $\omega_1$  – частота сканирования пучка поперек стыка или проекции коллимированного датчика, а  $\omega_2$  – частота сканирования по фокусу.

Функциональная схема системы автоматической фокусировки электронного пучка изображена на рис. 5.3.

В системе автоматической фокусировки может использоваться или вторично-эмиссионный датчик положения стыка свариваемого изделия, или рентгеновский коллимированный датчик, во втором случае стык не требуется. С помощью генератора ( $2\omega_1$ ) и делителя частоты на два осуществляется сканирование стыка с частотой  $\omega_1$ . От генератора  $\omega_2$  вводится гармоническая составляющая в ток фокусирующей системы, и диаметр пучка начинает колебаться с частотой  $\omega_2$ . В выходном сигнале вторично-эмиссионного или рентгеновского датчика появляются гармонические составляющие с частотами  $2\omega_1 \pm \omega_2$ .

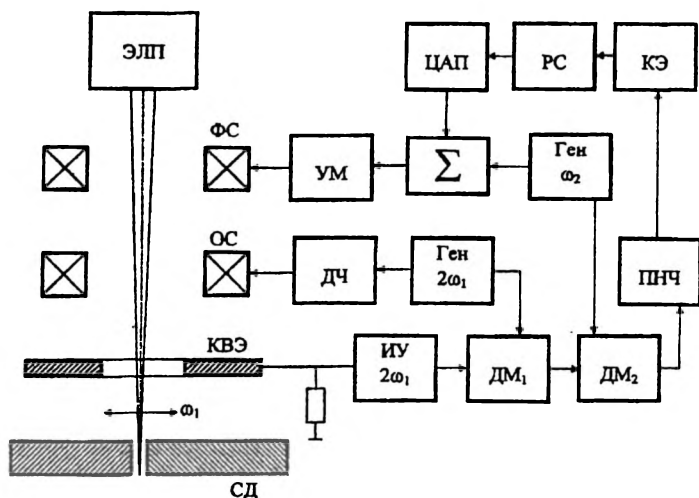


Рис. 5.3. Функциональная схема системы автоматической фокусировки: ФС – фокусирующая система; ОС – отклоняющая система; УМ – усилитель мощности; ДЧ – делитель частоты на два; Ген – генератор; ИУ – избирательный усилитель; ДМ – демодулятор; ПНЧ – преобразователь напряжение–частота; КЭ – ключевой элемент; РС – реверсивный счетчик; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЭЛП – электронно-лучевая пушка; СД – свариваемые детали; КВЭ – коллектор вторичных электронов

Как видно из рис. 2.14, эти составляющие имеют амплитуду и фазу, пропорциональную отклонению тока фокусирующей линзы от положения острого фокуса. Избирательный усилитель ИУ ( $2\omega_1$ ), настроенный в резонанс на частоту  $2\omega_1$ , имеет полосу пропускания, захватывающую боковые частоты  $2\omega_1 \pm \omega_2$ , при этом следует выбрать  $\omega_2 < \omega_1$ . На выходе демодулятора ДМ<sub>2</sub> формируется напряжение постоянного тока, пропорциональное отклонению фокуса. С помощью преобразователя напряжение–частота и реверсивного счетчика реализован цифровой интегратор, выход которого через цифро-аналоговый преобразователь-сумматор и усилитель мощности формирует ток фокусирующей системы, который устанавливается в положение острой фокусировки. Значение тока фокусирующей системы может быть зафиксировано после завершения операции фокусировки. Для этого ключевой элемент КЭ разрывает обратную связь системы путем прекращения подачи импульсов с ПНЧ в РС. Цифровой интегратор вносит в систему астатизм первого порядка. Избирательный усилитель и фильтр на вы-

ходе демодулятора могут быть описаны эквивалентным фильтром нижних частот в соответствии с выражением (2.31). Кроме того, они вносят дополнительное отставание по фазе. Обеспечение устойчивости замкнутой системы управления не вызывает затруднений, так как требуемые запасы устойчивости могут быть получены соответствующим выбором общего коэффициента усиления контура.

Рассмотренная система автоматической фокусировки работает при малом токе пучка и может быть использована для его предварительной фокусировки или записи программы тока фокуса в том случае, когда расстояние от пушки до свариваемого изделия изменяется в процессе сварки. Для фокусировки на рабочем токе пучка целесообразнее использовать рассмотренное в предыдущем разделе устройство контроля диаметра пучка, работающее как при малом, так и при большом токе электронного пучка. В этом случае положение фокуса можно получить, добиваясь минимального значения диаметра пучка. Этот метод рассмотрен в разд. 5.3.

### 5.3. Вопросы технической реализации системы

Для стабилизации плотности распределения энергии по сечению электронного пучка в процессе электронно-лучевой сварки должны быть решены следующие задачи:

- фокусировка электронного пучка на поверхности обрабатываемого изделия;
- контроль и стабилизация диаметра сфокусированного электронного пучка в процессе сварки;
- задание требуемого положения фокуса относительно поверхности обрабатываемого изделия.

Выполнение указанных приемов с необходимой точностью обеспечивает требуемую стабилизацию распределения энергии по сечению пучка относительно зоны обработки, а следовательно, и воспроизводимость геометрии сварного шва. Такой подход ранее не реализовывался из-за отсутствия датчика диаметра пучка, работающего в процессе сварки.

Основой системы является рассмотренное в предыдущем разделе измерительное устройство с рентгеновским датчиком плотности распределения энергии по сечению электронного пучка. В качестве метода выделения сигнала используется метод синхронного накопления, реализуемый программой работы на микроЭВМ. Применение вычислительной техники позволяет уменьшить число аппаратных средств, реализовать многие функции системы программным путем,

что в целом повышает надежность системы. Сравнение различных вариантов реализации системы позволило сделать вывод о целесообразности следующего распределения функций между программными и аппаратными средствами. Формирование траектории сканирования, усиление сигнала рентгеновского датчика, преобразование его в цифровой код, запоминание зондовой характеристики, управление эмиссионной системой пушки осуществляется аппаратными средствами, реализация алгоритма обработки информации, расчет эффективного диаметра пучка, его индикация, расчет требуемого управляющего воздействия и величины расфокусировки – программными средствами.

Функциональная схема системы представлена на рис. 5.4 и 5.5. Система состоит из трех основных блоков: блока выброса пучка, измерительного блока, блока коррекции и индикации. Управляет работой системы универсальный программируемый контроллер (КПУ). КПУ связан с внешними устройствами через шесть портов (А, В, С, А<sub>1</sub>, В<sub>1</sub>, С<sub>1</sub>), входящих в состав контроллера, а также через внутреннюю шину данных (ШД), шину адреса (ША) и шину управления (ШУ). Блок выброса пучка и измерительный блок изображены на рис. 5.5.

Блок выброса пучка (БВП) осуществляет вывод пучка из сварочной ванны, пересечение пучком зоны обзора коллимированного рентгеновского датчика в прямом и обратном направлении, а также фокусировку пучка на поверхности обрабатываемой детали на время выброса пучка. Развертка пучка производится цифровым генератором по 512 точкам. Генератор тактовых импульсов (ГТИ) через счетчик (СЧ<sub>1</sub>) выставляет на адресный вход постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) последовательность адресов ячеек памяти, в которых записаны координаты траектории сканирования пучка. Последовательность кодовых комбинаций с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) преобразуется в аналоговый сигнал, который через усилитель мощности (УМ) поступает в отклоняющую систему (ОС), осуществляющую требуемое перемещение пучка.

Фокусировка пучка на поверхности обрабатываемого изделия на время выброса пучка осуществляется путем снятия уставки расфокусировки, поступающей в динамическую фокусирующую систему (ФСД) с порта А КПУ через ЦАП и усилитель мощности. При этом за счет основной фокусирующей системы осуществляется фокусировка пучка на поверхности обрабатываемого изделия. Блок выброса пучка запускается с помощью сигнала ЗАП, вырабатываемого контроллером по команде с генератора синхронизации сети (ГСС). Таким образом, выброс пучка синхронизируется с фазой питающей сети для предотвращения влияния пульсаций тока пучка. Останавливается БВП сигналом «Стоп»,

который организуется счетчиком (СЧ<sub>1</sub>) после выборки всех адресов в ПЗУ.

В измерительном блоке осуществляется преобразование сигнала коллимированного рентгеновского датчика в цифровой код с помощью АЦП и запоминание его в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) блока. Аналоговый сигнал датчика попадает в АЦП через схему автоматической регулировки усиления (АРУ). Схема АРУ предназначена для компенсации постоянной составляющей и стабилизации амплитуды выходного сигнала при изменении тока пучка и его диаметра.

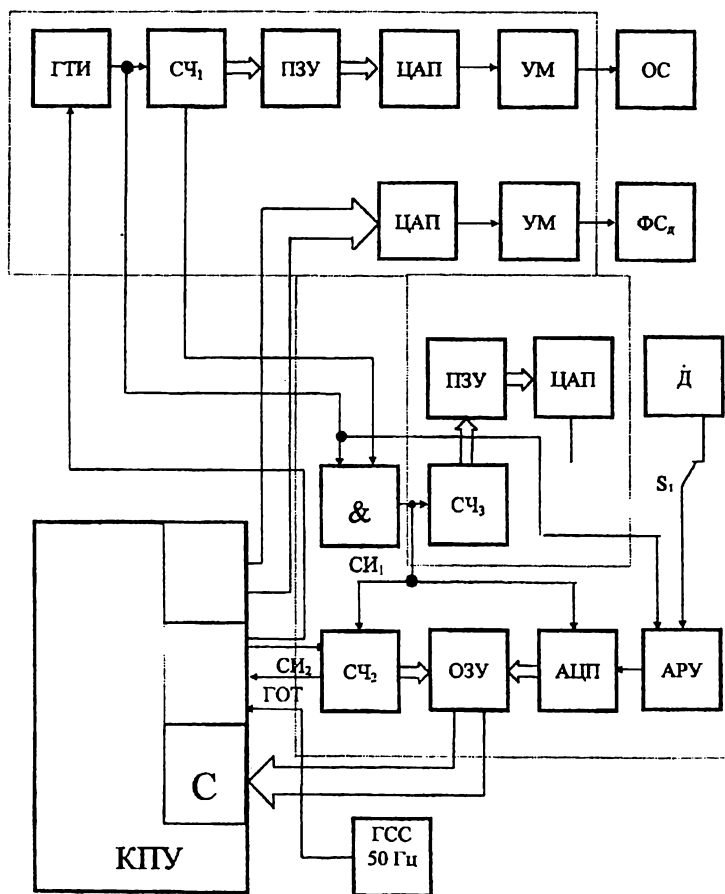


Рис. 5.4. Функциональная схема системы контроля и стабилизации плотности распределения энергии по сечению луча

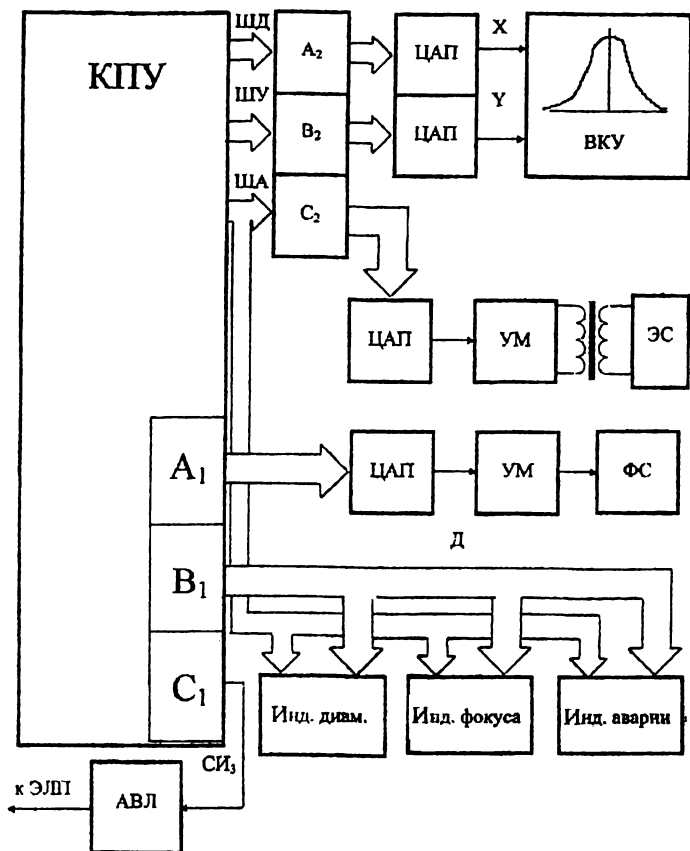


Рис. 5.5. Функциональная схема системы контроля и стабилизации плотности распределения энергии по сечению пучка. Блок коррекции и индикации

Измерение сигнала датчика производится в каждой точке траектории сканирования пучка при его обратном ходе. Работа блока синхронизируется синхри импульсами (СИ<sub>1</sub>), поступающими из блока выброса пучка от ГТИ. Коммутация адресов ячеек ОЗУ производится счетчиком СЧ<sub>2</sub> при поступлении тактовых импульсов СИ<sub>1</sub>. После заполнения ОЗУ измерительный блок формирует сигнал готовности «ГОТ», предупреждающий КПУ о завершении цикла сканирования и готовности измерительного блока к передаче информации.

Для считывания информации из ОЗУ контроллер подает синхри импульсы СИ<sub>2</sub> по одной из линий порта В на счетчик СЧ<sub>2</sub>. Счетчик



формирует адреса ячеек ОЗУ. Содержимое ячеек выставляется на шину данных ОЗУ и считывается контроллером через порт С.

Для проверки функционирования системы в состав измерительного блока введена схема (М), моделирующая сигнал рентгеновского датчика. В состав модели М входят счетчик СЧ<sub>3</sub>, ПЗУ и ЦАП. В ячейки ПЗУ записаны кодовые комбинации, соответствующие нормальному закону распределения плотности энергии. Модель подключается к измерительному блоку с помощью ключа S<sub>1</sub>. Использование модели позволяет осуществлять контроль состояния измерительно-преобразовательного блока, контроллера и блока индикации. Такая проверка необходима для контроля готовности системы к работе до включения электронно-лучевого оборудования.

Функциональная схема блока коррекции и индикации изображена на рис. 5.5. Блок коррекции и индикации предназначен для индикации расчетного значения диаметра пучка, тока фокусирующей линзы. Блок позволяет визуально оценить форму зондовой характеристики, осуществить автоматическую фокусировку электронного пучка на поверхности обрабатываемого изделия, стабилизировать диаметр сфокусированного электронного пучка за счет управления эмиссией катода электронно-лучевой пушки. Зондовая характеристика визуализируется с помощью видеоконтрольного устройства (ВКУ). В качестве ВКУ может быть использован осциллограф. На вход X подается траектория сканирования электронного пучка, на вход Y – обработанное значение плотности распределения энергии по координате сканирования. Выдача всех управляющих воздействий осуществляется контроллером путем подачи цифровых сигналов через внешние порты A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub> и преобразование их в аналоговую форму с помощью АЦП.

Управление эмиссией катода электронно-лучевой пушкой производится через внешний порт С<sub>2</sub>, цифро-аналоговый преобразователь и усилитель мощности, на выходе которого подключен накальный трансформатор, имеющий высоковольтную изоляцию вторичной обмотки. Управление эмиссией электронов с катода осуществляется за счет регулировки температуры катода. Изменение температуры катода приводит к изменению тока электронного пучка. В источнике питания электронно-лучевой пушки имеется система стабилизации тока электронного пучка за счет изменения отрицательного потенциала управляющего электрода. При увеличении эмиссии катода для стабилизации тока пучка увеличивается отрицательный потенциал управляющего электрода, а площадь съема электронов с катода уменьшается, следовательно, уменьшается и диаметр пучка. Управление эмиссией катода позволяет стабилизировать требуемые технологические параметры

электронного пучка в процессе износа катода, его запыления продуктами испарения свариваемого материала и влияния других факторов. Значение стабилизируемого диаметра пучка следует выбирать из условий технологического процесса, надежности и ресурса работы эмиссионной системы электронно-лучевой пушки.

Если диаметр электронного пучка не соответствует требуемому значению, то выдается индикация аварии. Аварийный вывод тока пучка производится схемой АВЛ по команде КПУ в случае недопустимых отклонений диаметра пучка или при сбое программы. Распознавание сбоя программы производится следующим образом. По одной из линий порта  $C_1$  на схему АВЛ поступают импульсы СИ<sub>3</sub>, которые характеризуют нормальный режим работы системы. При постоянном получении этих импульсов схема находится в состоянии блокировки. В случае прекращения поступления импульсов СИ<sub>3</sub> происходит разблокировка схемы АВЛ, которая производит уменьшение тока пучка и прекращает сварку.

Автоматическая фокусировка электронного пучка осуществляется через порт  $A_1$  КПУ, цифро-аналоговый преобразователь и усилитель мощности. В качестве контролируемого параметра используется диаметр электронного пучка. В КПУ реализуется алгоритм экстремального регулятора функции одной переменной. Фокусировка прекращается, когда за счет изменения тока в фокусирующей системе (ФС) достигается минимальный диаметр электронного пучка. На индикаторе при этом отображается ток фокусировки. Фокусировка обычно производится на малом токе пучка, а затем значение тока в фокусирующей системе фиксируется. Если же в процессе сварки расстояние до обрабатываемой поверхности изменяется, то режим фокусировки может периодически повторяться и на рабочем токе пучка.

Функциональная схема устройства автоматической регулировки усиления (АРУ) изображена на рис. 5.6. Устройство позволяет компенсировать постоянную составляющую и изменять коэффициент усиления в зависимости от амплитуды входного сигнала. При изменении входного сигнала в диапазоне  $-10 \dots 10$  В амплитуда сигнала на выходе не превышает 1 В. Это позволяет согласовать выход датчика рентгеновского излучения с диапазоном входных сигналов АЦП.

На рис. 5.7 показаны временные диаграммы, поясняющие работу АРУ. Схема работает следующим образом. Входной сигнал подается на 1-й вход сумматора. На выходе сумматора стоят компараторы  $K_1$  и  $K_2$ , настроенные на напряжение  $+0,1$  и  $-0,1$  В соответственно. Если входное напряжение превышает этот порог, то через логическую схему «ИЛИ» включается генератор  $G_1$ , выдающий тактовые импульсы с частотой 5 МГц. Система управления СУ<sub>1</sub> передает эти импульсы на счет-



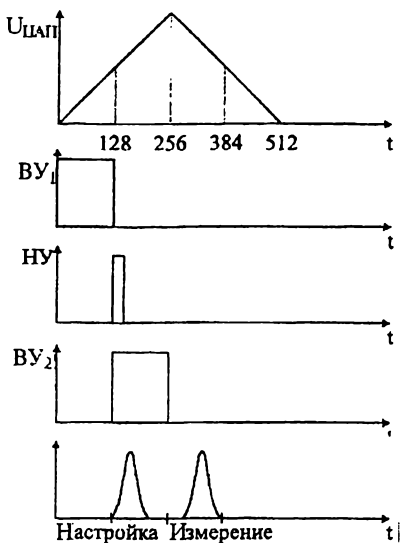


Рис. 5.7. Временные диаграммы работы блока АРУ

циентом усиления, определяемым кодовой комбинацией на цифровом входе ЦАП<sub>2</sub>. Кодовая комбинация, задающая коэффициент усиления, формируется счетчиком СЧ<sub>5</sub>. В начальный момент движения в зоне обзора датчика (128-я точка) схема управления СУ<sub>2</sub> формирует сигнал ВУ<sub>2</sub>, разрешающий работу счетчика, и сигнал НУ начальной установки, после чего счетчик СЧ<sub>4</sub> выставляет на цифровой вход ЦАП<sub>2</sub> кодовую комбинацию, соответствующую максимальному коэффициенту усиления. На выходе ЦАП<sub>2</sub> установлен компаратор К<sub>3</sub>, настроенный на напряжение +1 В. Если сигнал на выходе АРУ начинает превышать +1 В, компаратор К<sub>3</sub> срабатывает и запускает генера-

тор тактовых импульсов Г<sub>2</sub> с частотой 2 МГц. Тактовые импульсы подаются на счетчик СЧ<sub>4</sub>, работающий на вычитание. В результате коэффициент усиления уменьшается, и выходной сигнал АРУ не превышает 1 В. На 256-й точке сканирования СУ<sub>2</sub> снимает сигнал ВУ<sub>2</sub>, и коэффициент усиления становится постоянным. Во время обратного хода пучка на участке от 256-й до 384-й точки сигнал с датчика поступает на АЦП через схему АРУ с фиксированным напряжением смещения и постоянным коэффициентом усиления и записывается в ячейки памяти.

Рассмотрим алгоритм функционирования системы. Блок-схема алгоритма контроля и стабилизации диаметра пучка и фокуса приведена на рис. 5.8 и 5.9. Начальная установка заключается в настройке контроллера для задания направления обмена информацией. Полученную из ОЗУ измерительного блока информацию КПУ хранит в специально отведенной области памяти – ячейках-накопителях. Перед началом каждого цикла измерений накопители очищаются. Затем контроллер переходит в режим ожидания синхроимпульса сети. Синхроимпульс подается на одну из линий порта А с частотой 50 Гц. Контроллер постоянно опрашивает эту линию и при поступлении синхроимпульса запускает блок выброса пучка, организуя подачу сигнала ЗАП по одной из линий порта В. Затем КПУ переходит в режим ожидания сигнала

«ГОТ» от измерительного блока. Этот сигнал поступает на одну из линий порта примерно через 1 мс. При его поступлении КПУ переходит к считыванию информации из ОЗУ измерительного блока. С этой целью КПУ по одной из линий порта В посылает синхроимпульс на счетчик СЧ<sub>2</sub> измерительного блока. После поступления синхроимпульса СЧ<sub>2</sub> выставляет на адресный вход ОЗУ код адреса. Данные ОЗУ измерительного блока считываются контроллером через порт С и складываются с содержимым ячейки накопителя. Затем адрес накопителя меняется и производится новое считывание.

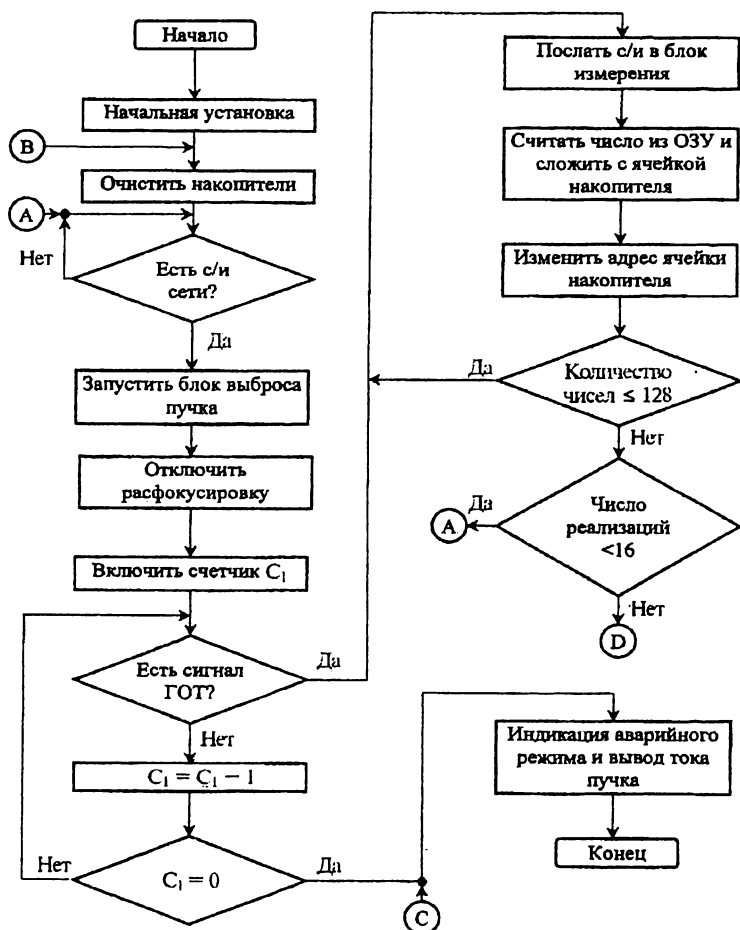


Рис. 5.8. Блок-схема алгоритма контроля и стабилизации диаметра пучка и фокуса

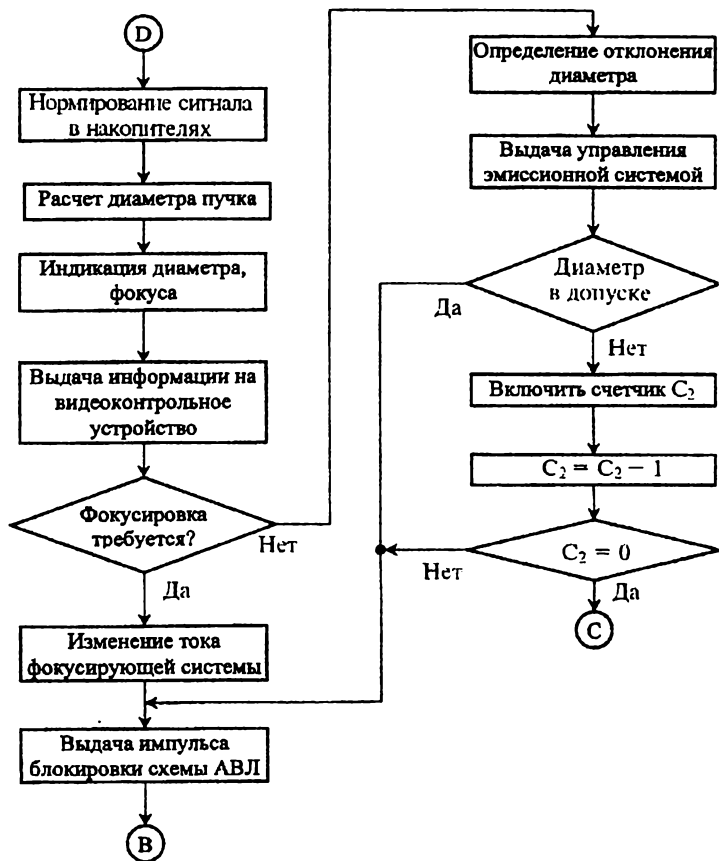


Рис. 5.9. Блок-схема алгоритма контроля и стабилизации диаметра пучка и фокуса (продолжение)

Всего считываются 128 чисел, после чего КПУ снова переходит в режим ожидания. В случае если сигнал «ГОТ» с измерительного блока не поступает, то это означает, что измерительный блок неисправен. С целью распознавания этой ситуации КПУ перед началом ожидания сигнала «ГОТ» на одном из своих регистров организует счетчик ( $C_1$ ), работающий на вычитание. В счетчик  $C_1$  загружается число, и после каждого опроса сигнала «ГОТ» содержимое счетчика уменьшается на 1. Если измерительный блок неисправен и сигнал «ГОТ» не поступает через 2 мс, счетчик  $C_1$  обнулится, КПУ организует индикацию аварийного режима и запускает схему аварийного вывода тока пучка.

После считывания 16-ти реализаций зондовой характеристики КПУ переходит к программе обработки сигнала в накопителях. Обработка производится в следующем порядке. Сигнал суммирования 16-ти реализаций зондовой характеристики нормируется путем деления каждой 16-разрядной ячейки накопителя на масштабный коэффициент  $K_{\text{мас}}$ , который приравнивает максимальную амплитуду к числу 256:

$$K_{\text{мас}} = \frac{A_{\text{max}}}{256}.$$

Затем производится расчет диаметра пучка по формулам (5.5) и (5.8), индикация диаметра пучка и тока фокусировки, и затем выдача нормированной зондовой характеристики на видеоконтрольное устройство.

Далее КПУ переходит к оценке необходимости фокусировки. Режим фокусировки задается с пульта. В режиме фокусировки на малом токе осуществляется автоматическая фокусировка электронного пучка. Для этого производится пошаговое изменение тока фокусирующей системы, контролируется значение диаметра пучка, оно сравнивается с предыдущим, и в зависимости от знака разности на следующем шаге производится либо увеличение, либо уменьшение тока фокусирующей системы. Процесс фокусировки прекращается, когда разность между текущим и предыдущим значением диаметра пучка становится меньше порогового уровня. Ток фокусирующей системы в этом случае фиксируется.

При сварке возможны два режима работы: с фокусировкой или без нее. В режиме фокусировки КПУ поочередно подключает режимы управления фокусировкой и управления эмиссионной системой. В режиме без фокусировки КПУ реализует только алгоритм управления эмиссионной системой. Для этого определяется отклонение диаметра пучка от заданного значения и вычисляется управляющее воздействие, пропорциональное этому отклонению. В случае если отклонение диаметра превышает допустимую величину, КПУ организует счетчик  $C_2$ , записав в него определенное число. После каждого цикла контроля диаметра и выдачи управляющего воздействия содержимое счетчика уменьшается на 1. Если содержимое счетчика  $C_2$  становится равным нулю, то это указывает на неисправность эмиссионной системы электронно-лучевой пушки, после чего включается индикация аварийного режима и вывод тока пучка.

Используя выражения (1.1) и (1.3), можно получить структурную схему линеаризованной системы стабилизации диаметра электронного пучка (рис. 5.10).

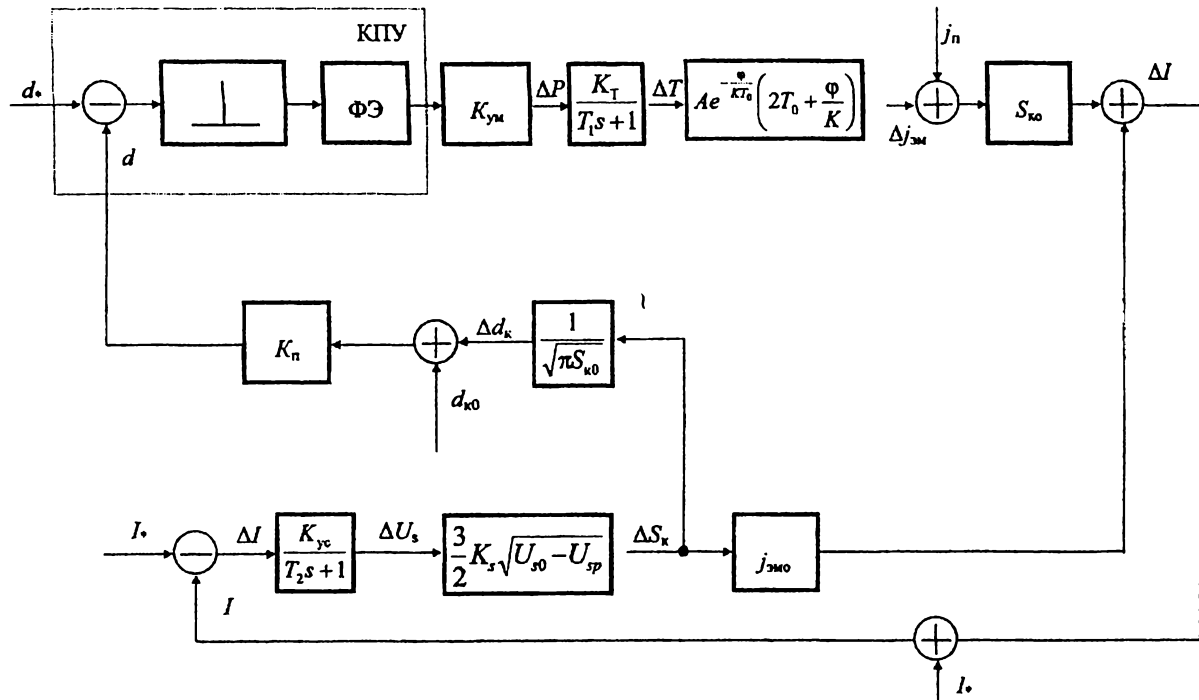


Рис. 5.10. Структурная схема системы стабилизации диаметра электронного пучка



Здесь приняты следующие обозначения:

$d_0$  – уставка диаметра пучка;

$I_0$  – уставка тока пучка;

$P$  – мощность нагрева катода;

$T$  – абсолютная температура катода;

$j_{эм}$  – плотность тока эмиссии катода;

$U_s$  – напряжение управляющего электрода пушки;

$U_{сп}$  – напряжение запирающего электрода;

$S_k$  – эффективная площадь катода (площадь, с которой эмитируются электроны);

$T_1$  – постоянная времени нагрева катода;

$d_k$  – эффективный диаметр катода;

$j_n$  – помеха, действующая на изменение эмиссии.

Величина  $K_s$  определяется из выражения (1.3) по формуле

$$G = K_s \cdot j_{эм}$$

Линеаризация проведена в окрестностях точки с параметрами:

$$S_{k0} = K_s (U_{s0} - U_{sp})^2;$$

$$j_{эм0} = AT_0^2 e^{-\frac{\phi}{kT_0}};$$

$$I_0 = S_{k0} \cdot j_{эм0}$$

Используя принцип суперпозиции, структурная схема относительно возмущающего воздействия преобразуется к виду рис. 5.11.

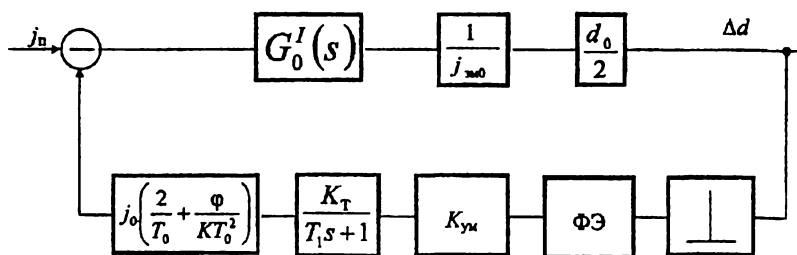


Рис. 5.11. Структурная схема системы стабилизации диаметра

Здесь введены следующие обозначения:  $G_0^I(s) = \frac{W_0^I(s)}{1 + W_0^I(s)}$  – пе-

редаточная функция замкнутого контура стабилизации тока пучка;

$$d_0 = K_n \cdot 2 \sqrt{\frac{S_{k0}}{\pi}} - \text{уставка диаметра пучка.}$$

Если контур стабилизации диаметра пучка разомкнут, то установившаяся ошибка равна

$$\Delta d \approx \frac{d_0}{2} \frac{j_n}{j_{эм0}},$$

т. е. относительное изменение диаметра пучка равно половине относительного изменения плотности тока эмиссии. Если же контур стабилизации диаметра пучка замкнут и содержит интегрирующее звено первого порядка, то установившаяся ошибка равна нулю. Для анализа и синтеза системы стабилизации используются известные методы теории дискретных систем управления.

Конструктивно система контроля и стабилизации плотности распределения энергии электронного пучка выполнена в виде отдельного системного блока и усилителя мощности, входящего в состав электронно-лучевого оборудования. Системный блок представлен на рис. 5.12. В состав системного блока входит плата контроллера, плата ЦАПов блока выброса пучка, измерительного блока, плата индикации, плата АРУ и модели и источника питания. На переднюю панель системного блока выведены элементы индикации диаметра пучка, тока фокусировки и режима работы системы.

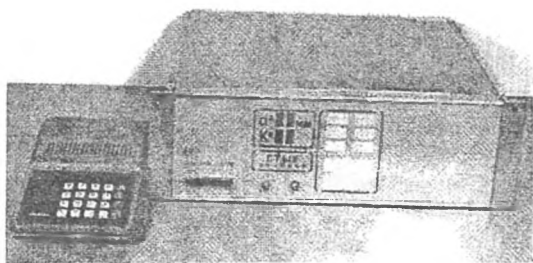


Рис. 5.12. Системный блок системы контроля и стабилизации плотности распределения энергии по сечению луча

В системном блоке использованы интегральные микросхемы К1108ПА1 (ЦАП), К1107ПВ2 (АЦП), К541РУ2 (ОЗУ).

На рис. 5.13 показан коллимированный рентгеновский датчик. Чувствительным элементом датчика является сцинтилляционный кри-

сталл на основе NaI. Преобразование световых импульсов в электрический сигнал производится с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-85. Для согласования выходного сигнала умножителя с сопротивлением кабельной сети в корпус датчика вмонтирован предварительный усилитель.

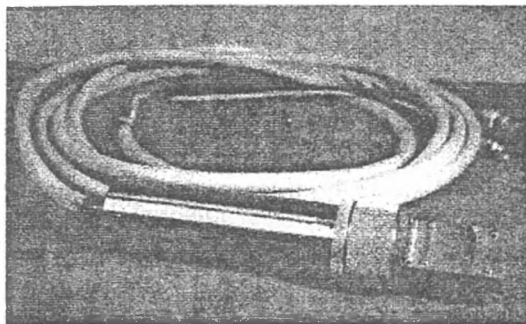


Рис. 5.13. Рентгеновский датчик с коллимированной насадкой

## Глава 6

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ

Глубина проплавления – один из важнейших параметров сварного шва. Поэтому стабилизация глубины проплавления является одной из задач управления электронно-лучевой сваркой. Наиболее распространенным способом стабилизации является воспроизведение режимов процесса, дающих заданную глубину проплавления. Причина такого подхода связана с отсутствием эффективных универсальных способов контроля глубины проплавления. Исключение составляет лишь способ контроля сквозного проплавления с использованием коллектора проникающих электронов. Сквозное проплавление сопровождается занижением шва и в ряде случаев не приемлемо. В этом случае прибегают к расчетным или расчетно-экспериментальным способам контроля, используя сигналы датчиков.

#### 6.1. Анализ рентгеновского излучения сварочной ванны

Рентгеновское излучение сварочной ванны распределено по каналу проплавления, поэтому, контролируя геометрические параметры зоны излучения, мы можем контролировать геометрические параметры канала проплавления.

При расчете рентгеновского излучения в канале проплавления необходимо учитывать его спектральный состав, зависимость интенсивности излучения от угла наклона обрабатываемой поверхности, поглощение электронов в парах металла, плотность распределения тока пучка по его сечению в канале проплавления, геометрические параметры канала проплавления.

Плотность тока по сечению пучка с достаточной точностью описывается нормальным законом распределения:

$$i = \frac{I_0}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right]. \quad (6.1)$$

Математическая модель канала проплавления также может быть представлена в форме нормального закона [148]:

$$H = H_0 \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_{xk}^2}\right] \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_{yk}^2}\right]. \quad (6.2)$$

Поглощение электронов в парах металла описывается формулой [148]

$$I_n = I \exp[-\alpha \rho(H + h)]. \quad (6.3)$$

где  $\alpha = 2,4 \cdot 10^6 U^{-2}$  – коэффициент поглощения;  $\rho$  – плотность пара;  $H$  – текущая глубина канала проплавления;  $h$  – высота парового столба над поверхностью обрабатываемого изделия.

Плотность пара связана с давлением в канале выражением  $\rho = \frac{3p}{c}$ , где  $c = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}}$  – скорость молекул. С учетом этих формул выражение для плотности пара примет вид

$$\rho = \frac{\mu}{kT} \left( \rho_{\text{ж}} g H + \frac{\sigma}{r_k} \right), \quad (6.4)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости (для Al  $\rho_{\text{ж}} = 2,37 \text{ г/см}^3$ );  $\mu$  – масса молекулы (для Al  $\mu = 44,8 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ );  $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ ;  $T$  – температура, K;  $g$  – ускорение свободного падения;  $r_k$  – радиус канала проплавления;  $\sigma$  – поверхностное натяжение.

Расчеты по формуле (6.4) при  $r_k = 0,05 \text{ см}$ ,  $H_0 = 1,5 \text{ см}$  дают  $\rho = 2,76 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$ . Поглощение электронов, рассчитанное при этих условиях и  $U = 60 \text{ кВ}$ , равно  $I_n = I \cdot 0,997$ .

Плотность пара в канале проплавления не является стабильной величиной. Она изменяется по периодическому закону. При малой плотности пара пучок фокусируется на дне канала, затем происходит взрывное вскипание металла, плотность пара увеличивается на 1–2 порядка, пучок расфокусируется и падающий поток энергии рассеивается на стенки канала.

Распределение плотности тока при прохождении электронным пучком в парах металла пути  $H + h$  может быть описано функцией Гаусса с эффективным радиусом [148]:

$$\sigma_n(H) = \sigma_n(0) \exp \left[ \frac{\sigma}{2} \int_{-h}^H n(H) dH \right], \quad (6.5)$$

где  $n(H) = \frac{\rho}{m_A}$  – концентрация атомов;  $m_A$  – масса атома (для Al  $m_A = 44,82 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ );  $\sigma$  – прямое эффективное электронное сечение

рассеяние на атом, определяемое выражением

$$\sigma = \frac{47,8}{U} z^{\frac{1}{3}} \left[ z - 1 - 4 \ln \frac{0,0678 U_i}{z^{\frac{1}{3}} U^{\frac{1}{2}}} \right] \cdot 10^{-16}, \quad (6.6)$$

где  $U_i$  – потенциал ионизации атома (для Al  $U_i = 5,98$  В).

Для ориентировочных расчетов концентрацию атомов  $n(H)$  можно считать постоянной по глубине канала, тогда высота столба  $h_c$  выбирается такой, что рассеивание электронов с постоянной концентрацией  $n$  эквивалентно рассеиванию с реальным законом изменения концентрации по высоте.

Расчет, проведенный по формулам (6.5), (6.6) при  $\rho = 2,76 \cdot 10^{-6}$ ,  $n(H) = \text{const}$ , дает  $\sigma_n(H_0) = \sigma_n(0) \cdot 1,4$ . Отсюда следует, что радиус пучка при прохождении пара в канале высотой 1,5 см увеличивается в 1,4 раза, а поглощение электронов при этом практически отсутствует. Увеличение радиуса в 1,4 раза приводит к уменьшению плотности падающего потока в 1,96 раз. Для того чтобы столб расплава периодически спускался на дно канала необходимо, чтобы плотность пара периодически становилась ниже величины, рассчитанной по формуле (6.4).

Полагаем, что в первом приближении плотность пара в канале может быть описана гармоническим законом

$$\rho = \rho_0 + \rho_m \sin \varphi, \quad (6.7)$$

где  $\varphi$  – фаза колебания канала.

Для оценки параметров необходимо знать падающий поток энергии. Предположим, что падающий поток энергии имеет плотность  $q_2 = 4,7 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Известно, что плотность энергии должна превышать критическую плотность  $q_2^*$ , в этом случае формируется канал проплавления. Для Al при  $U = 60$  кВ  $q_2 = 3 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> [148],  $\frac{q_2}{q_2^*} = 1,56$ .

Таким образом, исходная плотность энергии превосходит критическую в 1,56 раза. Изменение плотности происходит за счет рассеивания электронов на парах металла. Можно рассчитать по формуле (6.5) критическую плотность паров  $\rho^*$ , при которой увеличение радиуса будет в  $\sqrt{1,56} = 1,25$  раза:

$$\rho^* = 2,04 \cdot 10^{-6}.$$

При плотности паров  $\rho < \rho^*$  электронный пучок фокусируется на дне канала и обеспечивает взрывное вскипание. При  $\rho > \rho^*$  падающий поток рассеивается на стенки канала. Экспериментальными исследованиями установлено, что время, при котором  $\rho \leq \rho^*$ , составляет 5...10 % общего времени. Используя это условие можно определить параметры в уравнении (6.7). Для этого нужно узнать два значения  $\rho_{\max}$  и  $\rho_{\min}$ , при этом

$$\rho_0 = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2},$$

$$\rho_m = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{2}.$$

Учитывая, что  $\rho_{\min} < \rho^*$ , зададимся  $\rho_{\min} = 1,34 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{\max}$  получаем из формулы

$$\rho_{\max} = \frac{\rho_{\min}(1 + \cos 0,314) - 2\rho^*}{1 - \cos 0,314} = 2,7 \cdot 10^{-5}$$

В этом случае закон изменения плотности может быть определен как

$$\rho = 1,42 \cdot 10^{-5} + 1,28 \cdot 10^{-5} \sin \varphi.$$

Минимальной плотности паров  $\rho_{\min} = 1,36 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$  соответствует увеличение радиуса пучка  $\sigma_n(H_0) = 1,19\sigma_n(0)$ . Максимальной плотности паров  $\rho_{\max} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3$  соответствует  $\sigma_n(H_0) = 31\sigma_n(0)$ .

При таком увеличении радиуса электронный пучок рассеивается в основании канала проплавления.

Из рассмотренного можно сделать следующее заключение. В связи с тем что на парах металла поглощается незначительная доля энергии (1...3 %), то, вследствие рассеяния электронов, источник рентгеновского излучения распределен по стенкам канала проплавления, причем это распределение изменяется в зависимости от плотности паров. При минимальной плотности паров пучок фокусируется и достигает дна канала проплавления. При увеличении плотности паров пучок рассеивается на стенки канала проплавления и происходит плавление стенок.

Для того чтобы учесть влияние паров на изменение радиуса электронного пучка, в выражение (6.1) необходимо подставить значения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , рассчитанные по формулам (6.5), (6.7).

На рис. 3.3 изображена экспериментально полученная зависимость интенсивности рентгеновского излучения от угла падения пучка электронов на обрабатываемую поверхность. Наилучшим образом эта зависимость аппроксимируется выражением

$$J_{\Theta} = J_0 \left( 2,762 \sin \Theta - 1,762 \sin^2 \Theta \right) \quad (6.8)$$

где  $\Theta$  – угол между траекторией электрона и обрабатываемой поверхностью. Этот угол может быть представлен в виде суммы двух углов  $\Theta = \Theta_1 + \Theta_2$ , где  $\Theta_1$  – угол между обрабатываемой поверхностью и осью симметрии канала проплавления;  $\Theta_2$  – угол между осью симметрии канала и наиболее вероятным направлением движения электронов, которое связано с изменением радиуса пучка электронов под влиянием паров в канале проплавления.

По определению производной из уравнения (6.2)

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \Theta_1 &= \frac{dH}{dx dy} = -H_0 \left( \frac{x}{\sigma_{xk}^2} + \frac{y}{\sigma_{yk}^2} \right) \exp \left( -\frac{x^2}{2\sigma_{xk}^2} - \frac{y^2}{2\sigma_{yk}^2} \right) = \\ &= -\frac{\sqrt{2}}{\sigma_k} H \sqrt{-\ln \frac{H}{H_0}} = \Phi(H). \end{aligned}$$

Из уравнения (6.5) при  $n(H) = n = \text{const}$  получим

$$\operatorname{ctg} \Theta_2 = \left[ \frac{d\sigma(H)}{dH} \right]^{-1} = \frac{1}{\sigma_{\pi}(0) \frac{\sigma n}{2} \exp \left[ \frac{\sigma n}{2} H \right]} = \frac{1}{D(H)}.$$

Тогда уравнение (6.8) может быть записано в виде

$$\begin{aligned} J_{\Theta} &= J_0 \left[ \frac{2,762}{\sqrt{1 + \left[ \frac{\Phi(H) + D(H)}{\Phi(H)D(H) - 1} \right]^2}} - \frac{1,762}{1 + \left[ \frac{\Phi(H) + D(H)}{\Phi(H)D(H) - 1} \right]^2} \right] = \\ &= J_0 K_{\Theta}(H, \rho). \end{aligned} \quad (6.9)$$

Выражение (6.9) описывает зависимость интенсивности рентгеновского излучения от угла падения электронного пучка на обрабатываемую поверхность, который представлен в виде функции от текущей



глубины канала  $H$  и концентрации  $n$  частиц пара в канале проплавления.

С учетом выражений (3.8), (6.1), (6.3), (6.9) распределение рентгеновского излучения по каналу проплавления может быть записано в виде

$$J(x, y) = \frac{0,341 \cdot 10^{-37} zI}{2\pi\sigma_x(H, \rho)\sigma_y(H, \rho)} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2(H, \rho)}\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{(y - m_y)^2}{2\sigma_y^2(H, \rho)}\right) \exp(-\alpha\rho H) K_\Theta(H, \rho) \int_0^{v_0} (v_0 - v) dv, \quad (6.10)$$

где  $\sigma_x(H, \rho)$  и  $\sigma_y(H, \rho)$  определяются по формуле (6.5), плотность пара  $\rho$  изменяется по периодическому закону в соответствии с выражением (6.7), текущая глубина канала проплавления  $H$  определяется выражением (6.2). Выражение (6.10) устанавливает распределение интенсивности рентгеновского излучения по координатам  $X$  и  $Y$ . Интерес также представляет распределение интенсивности рентгеновского излучения по глубине канала проплавления.

Из выражения (6.2) получим

$$y^2 = -\frac{\sigma_{yk}^2}{\sigma_{xk}^2} x^2 - 2\sigma_{yk}^2 \ln \frac{H}{H_0},$$

Подставляя это выражение в (6.1), полагая  $m_y = 0$ ,  $\sigma_{xk} = \sigma_{yk}$ , после несложных преобразований получим

$$J(H, \rho) = 0,341 \cdot 10^{-37} zI \frac{v_0^2}{2} \left\{ \frac{1}{H_0} \frac{\sqrt{2}}{2} \left( 4 \frac{\sigma_{yk}^2}{\sigma_y^2(H, \rho)} + 1 \right) \sqrt{-\ln \frac{H}{H_0}} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^{\frac{\sigma_{yk}^2}{\sigma_y^2(H, \rho)}} \exp(-\alpha\rho H) K_\Theta(H, \rho) \right\}. \quad (6.11)$$

Выражение (6.11) дает распределение интенсивности рентгеновского излучения по глубине канала  $H$  в зависимости от плотности пара  $\rho$ , которая определяется выражением (6.7) и является функцией фазы  $\varphi$  периодического процесса.

Усредненная по времени (интегральная) интенсивность имеет вид

$$J(H) = 0,341 \cdot 10^{-37} zI \frac{v_0^2}{2} \left\{ \frac{1}{H_0} \frac{\sqrt{2}}{2} \int_0^{2\pi} \left( \frac{4\sigma_{yк}^2}{\sigma_y^2(H, \rho)} + 1 \right) \sqrt{-\ln \frac{H}{H_0}} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^{\frac{\sigma_{yк}^2}{\sigma_y^2(H, \rho)}} \exp(-\alpha \rho H) K_\Theta(H, \rho) d\varphi \right\}. \quad (6.12)$$

На рис. 6.1 изображено распределение интенсивности рентгеновского излучения по глубине канала проплавления, полученное по выражению (6.11) в фигурных скобках при трех значениях  $\rho = \rho_{\min}$ ,  $\rho = \rho_{\max}$ ,  $\rho = \rho_{\text{ср}}$ . Расчеты проводились при  $\rho = 1,42 \cdot 10^{-5} + 1,28 \cdot 10^{-5} \sin \varphi$  для алюминия при  $U = 60$  кВ. На этом же рисунке изображено интегральное распределение, рассчитанное по формуле (6.12). Из графиков следует, что при минимальной плотности пара пучок фокусируется на дне канала и рентгеновское излучение сосредоточено вблизи дна канала. При максимальной плотности пара рентгеновское излучение имеет наибольшую интенсивность в основании канала проплавления.

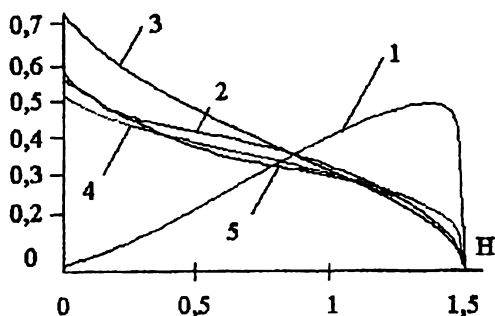


Рис. 6.1. Распределение интенсивности рентгеновского излучения вдоль канала проплавления: 1 —  $\rho = \rho_{\min}$ ; 2 —  $\rho = \rho_{\text{ср}}$ ; 3 —  $\rho = \rho_{\max}$ ; 4 — интегральная кривая; 5 — экспериментальная

Адекватность математической модели оценена экспериментальными исследованиями. Схема эксперимента изображена на рис. 6.2. Сварка проводилась вблизи края образца. Рентгеновский датчик установлен на приводе вертикального перемещения, соединенного с движком потенциометрического датчика перемещения. Рентгеновский дат-

чик снабжен коллимационной щелью, которая ограничивает зону его обзора небольшим участком по глубине канала проплавления. Сигнал, пропорциональный интенсивности рентгеновского излучения, и координата перемещения датчика поступают на двухкоординатный самописец. Полученная экспериментальная характеристика изображена на рис. 6.1.

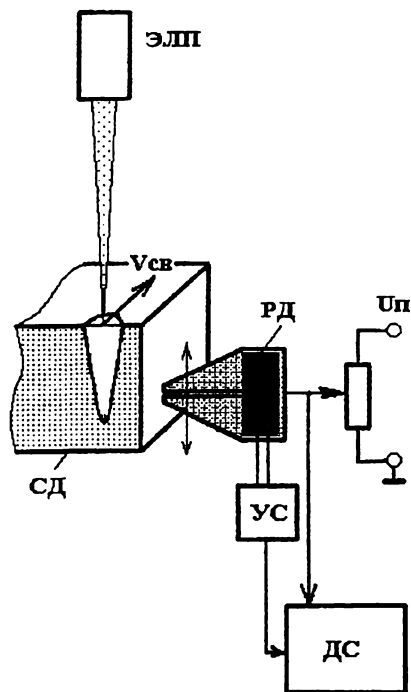


Рис. 6.2. Схема эксперимента для контроля распределения интенсивности рентгеновского излучения по каналу проплавления: ЭЛП – электронно-лучевая пушка; СД – свариваемая деталь; РД – рентгеновский датчик; УС – усилитель; ДС – двухкоординатный самописец

Сравнительная оценка теоретической, интегральной и экспериментальной характеристик показывает, что они достаточно хорошо согласуются. Некоторое расхождение вблизи поверхности обрабатываемого изделия объясняется погрешностью представления канала проплавления гауссовской функцией. Анализ поперечного сечения сварного шва показывает, что интегральная и экспериментальная характеристики достаточно точно воспроизводят изменение зоны про-

плавления по глубине шва. Это указывает еще и на то, что интенсивность рентгеновского излучения может служить оценкой энергетических процессов в канале проплавления при электронно-лучевой сварке.

Проведенные исследования показывают, что выражения (6.10), (6.11) и (6.12) пригодны для качественной и количественной оценки распределения интенсивности рентгеновского излучения по каналу проплавления, а также в качестве математической модели распределения энергии электронного пучка по глубине канала проплавления.

## 6.2. Способ контроля и стабилизации глубины проплавления по рентгеновскому излучению сварочной ванны, измеряемому со стороны электронно-лучевой пушки

Связь между секундным объемом проплавления и энергетическими параметрами процесса описывается уравнением [148]

$$\vartheta F_{\text{пр}} = \frac{0,24IU\eta_{\text{и}}\eta_{\text{т}}}{\rho(cT_{\text{пл}} + L_{\text{пл}})}, \quad (6.13)$$

где  $\vartheta$  – скорость сварки;  $F_{\text{пр}}$  – площадь зоны проплавления;  $I$  – ток луча;  $U$  – ускоряющее напряжение;  $\eta_{\text{и}}$  – эффективный КПД;  $\eta_{\text{т}}$  – термический КПД;  $L_{\text{пл}}$  – удельная энергия плавления;  $\rho$  – плотность металла;  $c$  – удельная теплоемкость;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления.

В случае когда канал проплавления имеет гауссову форму, площадь проплавления равна  $F_{\text{пр}} = H_0\sigma_k\sqrt{2\pi}$ .

Из выражения (6.13) глубина проплавления определяется в виде

$$H_0 = \frac{kIU}{\vartheta\sigma_k}, \quad (6.14)$$

$$\text{где } k = \frac{0,24\eta_{\text{и}}\eta_{\text{т}}}{\sqrt{2\pi\rho(-T_{\text{пл}} + L_{\text{пл}})}}.$$

Из (6.14) видно, что для расчета глубины проплавления необходимо знать ускоряющее напряжение, ток пучка, скорость сварки и радиус канала проплавления, которые целесообразно контролировать непосредственно в процессе ЭЛС. Наиболее трудно определяемым параметром является радиус канала проплавления. Эту величину можно получить, контролируя геометрические параметры области рентгеновского излучения сварочной ванны. Для этой цели воспользуемся рентгеновским датчиком со сканирующей коллимационной щелью. В этом случае электронный пучок остается неподвижным, а зона обзора

рентгеновского датчика периодически сканирует канал проплавления. Схема такого датчика изображена на рис. 6.3. Неподвижная и подвижная диафрагмы изготовлены из материала с высокой удельной плотностью, поглощающего рентгеновское излучение. Ширина щели в диафрагмах  $\delta \ll \delta_n$ . При вращении подвижной диафрагмы зона обзора рентгеновского датчика на поверхности обрабатываемого изделия, имеющая форму узкой полосы, периодически перемещается по координате  $X$ , пересекая канал проплавления. Длина щели достаточна для того, чтобы в зону обзора датчика по координате  $Y$  входил весь канал проплавления. Таким образом, рентгеновский датчик интегрирует все излучение по координате  $Y$  с учетом его поглощения в слое металла обрабатываемого изделия, расположенного между зоной обработки и датчиком.

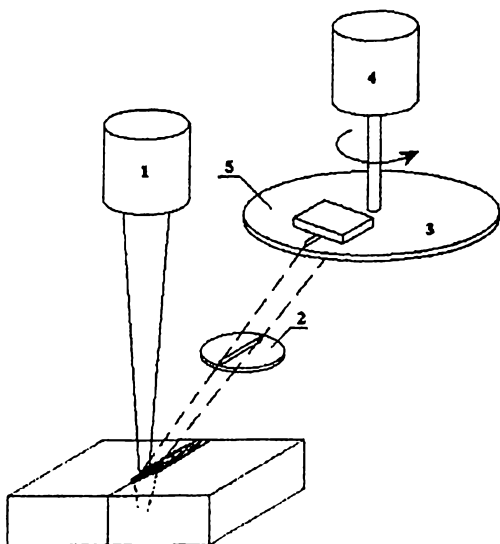


Рис. 6.3. Схема рентгеновского датчика: 1 – электронно-лучевая пушка; 2 – неподвижная диафрагма; 3 – вращающаяся диафрагма; 4 – электродвигатель; 5 – сцинтиляционный кристалл

Для данной частоты  $\nu$  рентгеновского излучения ослабление в слое металла описывается выражением [160]

$$J_\nu = J_{0\nu} \exp[-\mu(\nu)\ell(H)], \quad (6.15)$$

где  $\ell(H)$  – толщина слоя материала;  $\mu(\nu)$  – коэффициент ослабления.

В работе [160] приводится таблица значений массового коэффициента ослабления для различных материалов и ускоряющих напряжений. Использование этой таблицы и программы интерполяции позволило получить следующее аналитическое выражение для коэффициента ослабления [93]:

$$\mu(v) = a_0 + \frac{a_3}{v^3}, \quad (6.16)$$

которое для алюминия имеет вид

$$\mu(v) = 0,4344 + \frac{1046,115 \cdot 10^{-54}}{v^3}.$$

Толщина слоя металла  $\ell(H) = \frac{H}{\sin \varphi}$ , где  $\varphi$  – угол между линией, соединяющей датчик с зоной обработки, и поверхностью обрабатываемого изделия.

Доля рентгеновского излучения, попадающего на рентгеновский датчик, определяется в виде

$$J_d = J \frac{\alpha \beta}{4\pi^2} = K_1 J, \quad (6.17)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – телесные углы на рабочую поверхность рентгеновского датчика из точки взаимодействия пучка электронов с обрабатываемой поверхностью.

С учетом (6.10), (6.15) и (6.16) выражение (6.17) запишется в виде

$$\begin{aligned} J_d(\varepsilon) = & 0,341 \cdot 10^{-37} I_z K_1 \int_{\varepsilon - \frac{\delta}{2}}^{\varepsilon + \frac{\delta}{2}} \frac{1}{2\pi \sigma_x(H, \rho) \sigma_y(H, \rho)} \times \\ & \times \exp\left[-\frac{(x + \varepsilon)^2}{2\sigma_{xn}^2(H)}\right] \int_{-3\sigma_{yn}}^{+3\sigma_{yn}} K_{\Theta}(H) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{yn}^2}\right) \times \\ & \times \exp(-\alpha \rho H) \int_0^{v_0} (v - v_0) \exp[-\mu(v)\ell(H)] dx dy dv. \end{aligned} \quad (6.18)$$

Уравнение (6.18) устанавливает зависимость сигнала рентгеновского датчика от величины смещения зоны обзора  $\varepsilon$  от оси электрон-

ного пучка. На рис. 6.4 изображены характеристики выходного сигнала рентгеновского датчика, рассчитанные по модели (6.18) при различных значениях глубины  $H_0$  канала проплавления. Из графиков видно, что они идут узким пучком у основания, и можно выбрать некоторый порог  $\Pi$ , превышение которого указывает на ширину зоны рентгеновского излучения. Выберем величину этого порога такой, чтобы ширина области  $\epsilon$ , при которой  $J_d(\epsilon) \geq \Pi$ , была равна  $5\sigma_k$ . В общем случае величину порога можно рассчитывать по формуле

$$\Pi = -U^2 I_z \left( a + \frac{b}{\sigma_k} \right). \quad (6.19)$$

При  $U = 60$  кВ для алюминия ( $z = 13$ )

$$\Pi = 1 \cdot 10^{-37} I \left( 0,001729 + \frac{0,6934}{\sigma_k} \right).$$

Методическая погрешность расчета  $\sigma_k$  при этом не превышает 1,5 %.

Зависимость порога от радиуса канала вызвана тем, что амплитуда сигнала датчика связана с радиусом канала.

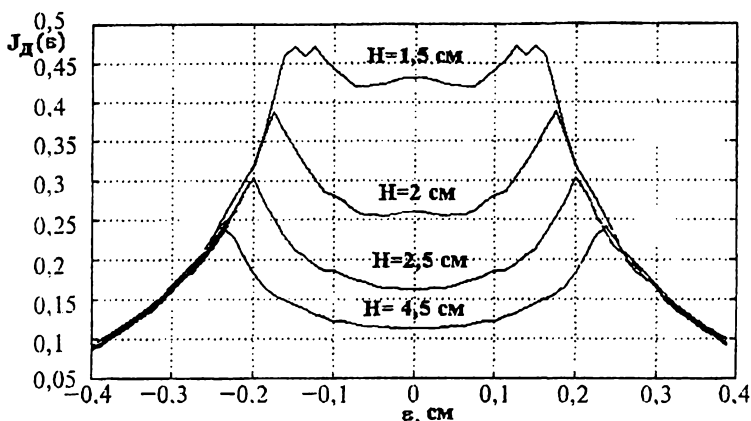


Рис. 6.4. Характеристики выходного сигнала

В выражении (6.19) для определения порога используется  $\sigma_k$ , а по порогу опять же вычисляется  $\sigma_k$ . Поэтому для вычислений используется итерационная процедура, в которой задаются начальным значением  $\sigma_{k0}$ , вычисляется порог  $\Pi$  по формуле (6.19), рассчитывается рас-

стояние  $5\sigma_x$  между крайними точками характеристики, удовлетворяющими условию  $J_d(\epsilon) \geq \Pi$ , и определяется первое приближение  $\sigma_{x1}$ . Затем процесс вычисления повторяется несколько раз, пока не получится установившееся значение  $\sigma_x$ .

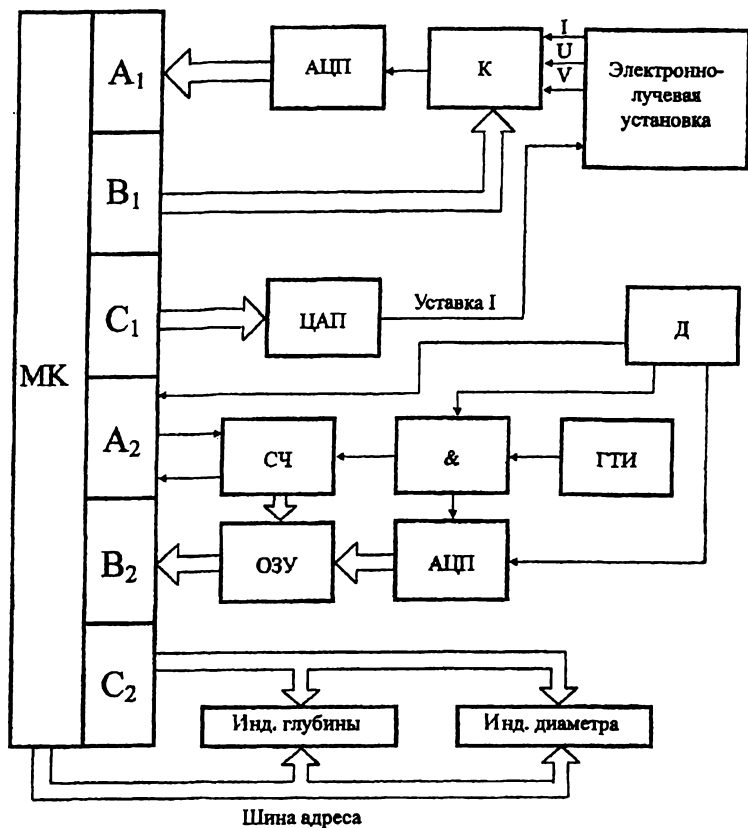


Рис. 6.5. Функциональная схема микропроцессорной системы контроля и управления глубиной проплавления при ЭЛС: Д – рентгеновский датчик; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; К – коммутатор; СЧ – счетчик; ГТИ – генератор тактовых импульсов; МК – микропроцессорный контроллер; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; & – логическое устройство; A<sub>1</sub>...C<sub>2</sub> – порты ввода/вывода

Расчет глубины проплавления производится по формуле (6.14). Учитывая, что математическая модель получена с некоторыми допущениями, кроме того значения КПД  $\eta_n$  и  $\eta_t$  меняются в некоторых



пределах в зависимости от режимов сварки, коэффициент  $k$  в формуле (6.14) следует уточнить по результатам экспериментов. На рис. 6.5 изображена функциональная схема микропроцессорной системы для контроля и управления глубиной проплавления при ЭЛС. Система состоит из микропроцессорного контроллера МК, устройства связи с объектом (УСО) и блока индикации. С электронно-лучевой установки ЭЛУ через коммутатор К и АЦП снимается информация о токе пучка, ускоряющем напряжении и скорости сварки. С рентгеновского датчика со сканирующей коллимационной щелью сигнал подается на аналого-цифровой преобразователь и записывается во внешнее ОЗУ, адресное пространство которого формируется счетчиком СЧ, который управляется от генератора тактовых импульсов ГТИ через логическую схему И. По окончании записи счетчик выдает в контроллер МК сигнал, и МК начинает считывать информацию из ОЗУ, изменяя состояния счетчика. Алгоритм обработки информации в контроллере реализует метод накопления, усредняющий информацию 16-ти реализаций сигнала датчика. Это позволяет повысить помехозащищенность и точность метода за счет уменьшения случайных ошибок. Рассчитанное значение глубины проплавления сравнивается с заданным значением, и в соответствии с разностью формируется уставка тока пучка. На цифровые индикаторы выводятся значения глубины проплавления и диаметр технологического электронного пучка.

На рис. 6.6 изображена структурная схема микропроцессорной системы стабилизации глубина проплавления. В этой схеме  $W(z)$  – дискретная передаточная функция микропроцессора;  $W_0^I$  – передаточная функция канала стабилизации тока электронного пучка, имеющая вид

$$W_0^I(S) = \frac{KI}{T_1S + 1};$$

$W_k(S)$  – передаточная функция канала проплавления, устанавливающая связь между глубиной проплавления и током электронного пучка:

$$W_k(S) = \frac{kU}{\vartheta\sigma_k(T_2S + 1)},$$

где постоянная времени  $T_2$  отражает динамику глубины канала проплавления. Процесс углубления канала проплавления является прерывистым. Время процесса образования канала есть суммарное время элементарных циклов, каждый из которых включает испарение слоя и последующую экранировку электронного пучка парами. За каждый цикл происходит углубление канала на величину проникновения элек-

тронов в металл, которая в соответствии с формулой Шонланда равна

$$\delta = 2,35 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\rho},$$

где  $\rho$  – плотность обрабатываемого металла.

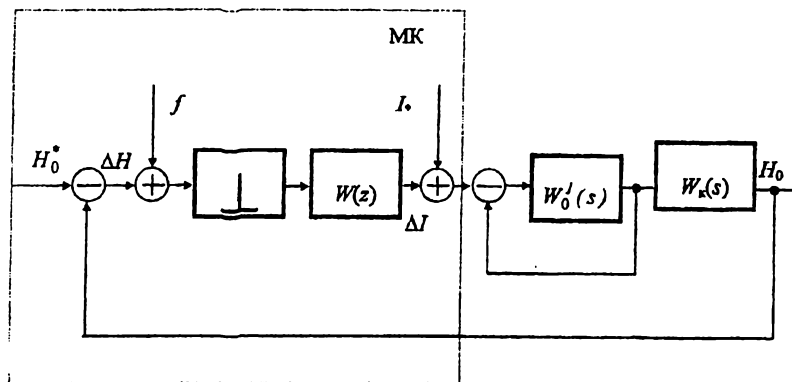


Рис. 6.6. Структурная схема системы стабилизации глубины проплавления

Время элементарного цикла состоит из двух компонентов: времени энергонакопления для взрывного вскипания  $\tau_n$  и времени рассеивания  $\tau_p$ . Общее время углубления канала равно  $t = n(\tau_n + \tau_p)$ , где  $n = \frac{H_0}{\delta}$  – количество элементарных циклов.

Постоянная времени канала проплавления определяется выражением [148]

$$T_2 = \frac{\rho L_{исп} H_0}{q_2} + \frac{\rho H_0^2 d^2 \alpha}{\mathfrak{S}_n d_k^2 \ln \left( \frac{q_2}{q_2^*} \right)}, \quad (6.20)$$

где  $\rho$  – плотность металла;  $L_{исп}$  – удельная энергия взрывного вскипания;  $q_2$  – удельная мощность луча;  $\alpha$  – коэффициент поглощения;  $\mathfrak{S}_n$  – скорость разлета частиц пара;  $q_2^*$  – критическая удельная мощность. Расчет по формуле (6.20) для  $U = 60$  кВ;  $H_0 = 1,5$  см,  $d_n/d_k = 0,5$ , материал алюминий дает значение  $T_2 = 0,232$  С.

Анализ и синтез системы стабилизации, проведенный известными методами теории дискретных систем управления, дает следующие

параметры системы: время регулирования 0,2 с, точность стабилизации глубины проплавления составляет 3...5 % от номинальной величины.

### 6.3. Способ контроля и стабилизации глубины проплавления с рентгеновским датчиком, размещенным с обратной стороны сварного шва

Предложенный способ основан на поглощении рентгеновского излучения сварочной ванны материалом обрабатываемого изделия. Ослабление интенсивности рентгеновского излучения слоем материала толщиной  $\ell$  подчинено экспоненциальному закону в соответствии с выражением (6.15), причем коэффициент ослабления  $\mu(\nu)$  зависит от частоты  $\nu$  излучения в соответствии с выражением (6.16). Интегральная интенсивность по всем частотам излучения определяется выражением

$$J = \int_0^{\nu_0} J_{0\nu} \exp[-\mu(\nu)\ell(H)] d\nu. \quad (6.21)$$

На рис. 6.7 изображена схема контроля глубины проплавления рентгеновским датчиком, размещенным с обратной стороны сварного шва [15; 96]. Рентгеновский датчик размещен в металлической бленде, не пропускающей рентгеновское излучение с боковых поверхностей, и ориентирован на зону обработки. Толщина слоя  $\ell$  будет различна для различных участков канала проплавления и определяется выражением

$$\ell(H) = d - H. \quad (6.22)$$

Датчик рентгеновского излучения имеет зону обзора, захватывающую весь канал проплавления, поэтому плотность рентгеновского излучения (6.10) необходимо проинтегрировать по координатам  $x$  и  $y$  и с учетом выражений (6.21) и (6.22). Суммарная интенсивность рентгеновского излучения, попадающего на датчик, имеет вид

$$J_d(\varphi) = 0,341 \cdot 10^{-37} zIK_1 \int_{-3\sigma_x}^{+3\sigma_x} \int_{-3\sigma_y}^{+3\sigma_y} \frac{1}{2\pi\sigma_x(H,\rho)\sigma_y(H,\rho)} \times \\ \times \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2(H,\rho)}\right] \exp\left[-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2(H,\rho)}\right] \times \\ \times \exp(-\alpha\rho H) K_\Theta(H,\rho) \int_0^{\nu_0} (\nu_0 - \nu) \exp[-\mu(\nu)\ell(H)] dx dy d\nu. \quad (6.23)$$

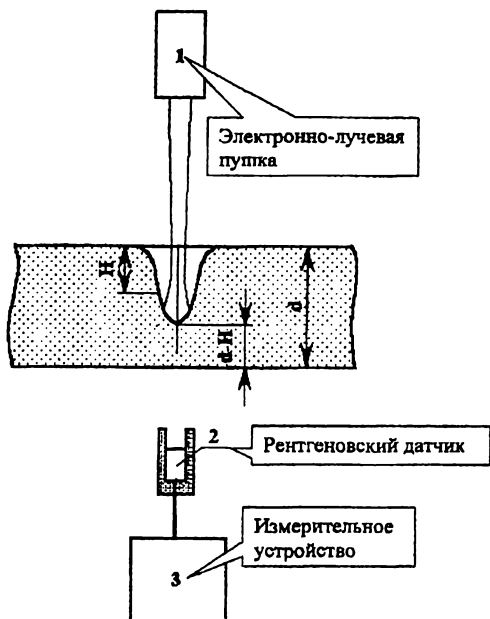


Рис. 6.7. Схема контроля глубины проплавления рентгеновским датчиком, размещенным с обратной стороны сварного шва

Выражение (6.23) дает зависимость сигнала датчика от фазы  $\varphi$  периодического процесса формирования канала проплавления при различных значениях толщины деталей и глубины проплавления.

На рис. 6.8 изображена характеристика датчика, рассчитанная по формуле (6.23). Из характеристики видно, что сигнал датчика зависит от фазы процесса формирования канала. Максимальные значения  $J_d$  соответствуют минимальной плотности пара, когда электронный пучок фокусируется на дне канала. Максимальная и минимальная интенсивность рентгеновского излучения отличаются на два порядка. Из расчетов следует, что сигнал рентгеновского датчика, расположенного с обратной стороны сварного шва, представляет последовательность относительно кратковременных импульсов, амплитуда которых зависит от степени фокусировки пучка на дне канала проплавления и величины непроплава. Очевидно, что для контроля глубины проплавления целесообразно использовать амплитуду импульсов датчика. Следует иметь в виду, что амплитуда импульсов зависит не только от величины непроплава, но и от степени фокусировки пучка на дне канала проплавления, которая в значительной степени определяется плотностью паров.

Поэтому амплитуда импульсов подвержена случайным изменениям, связанным с флуктуациями газодинамических и гидродинамических процессов в сварочной ванне. Для уменьшения влияния флуктуаций амплитуды необходимо осуществлять статическую обработку информации, например рассчитывая среднее значение амплитуды за некоторый период времени.

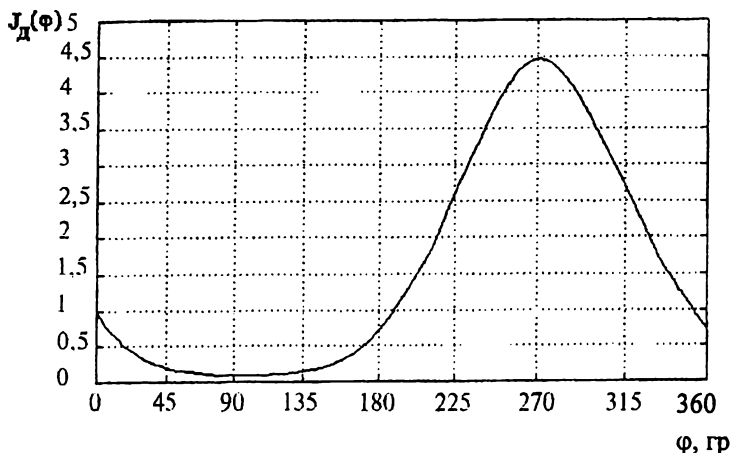


Рис. 6.8. Характеристика рентгеновского датчика величины непроплава.

Для расчета амплитудных значений сигнала датчика в формулу (6.23) следует подставить значение  $\rho = \rho_{\text{мин}}$ .

На рис. 6.9 изображена зависимость амплитуды пульсаций сигнала рентгеновского датчика от величины непроплава  $J_{\text{д1}}$ . Из этой характеристики видно, что амплитуда пульсаций в выходном сигнале рентгеновского датчика зависит от величины непроплава  $\ell = d - H_0$  и эту зависимость можно аппроксимировать с помощью выражения

$$\ell = d - H_0 = A \exp(-BJ_{\text{д}}), \quad (6.24)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  зависят от ускоряющего напряжения и тока пучка. Для ускоряющего напряжения  $U = 60$  кВ значения коэффициентов равны

$$A = 1,731, \quad B = \frac{0,4835}{0,341 \cdot 10^{-37} \text{ зИК}_1}.$$

Для ускоряющего напряжения  $U = 30$  кВ

$$A = 0,9112, \quad B = \frac{26}{0,341 \cdot 10^{-37} zIK_1}$$

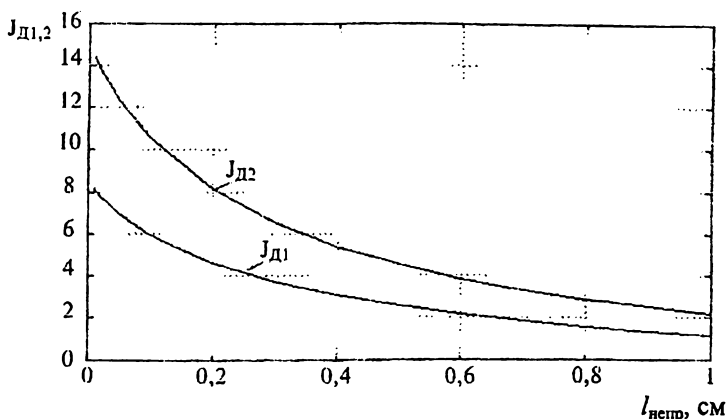


Рис. 6.9. Характеристики рентгеновских датчиков

Погрешность аппроксимации характеристики (выражение (6.24)) в диапазоне непроплава  $\ell = 0,01 \dots 0,1$  см не превышает 0,02 см. Это указывает на то, что выражение (6.24) может быть использовано для расчета глубины непроплава по результатам показаний датчика рентгеновского излучения, установленного с обратной стороны сварного шва, и измерений тока электронного пучка и ускоряющего напряжения. Расчеты, выполненные по формуле (6.23) для различных ускоряющих напряжений в диапазоне от 20 до 120 кВ, позволили выявить зависимость коэффициентов выражения (6.24) от ускоряющего напряжения  $U$ , кВ:

$$A = 0,9111 - 0,0167U + 0,607 \cdot 10^{-3}U^2, \quad (6.25)$$

$$B = \frac{1}{0,341 \cdot 10^{-37} zIK_1} \left[ -18,91 + \frac{49,2}{10^{-1}U} - \frac{37,43}{10^{-2}U^2} + \frac{0,2506}{10^{-3}U^3} + \frac{10,67}{10^{-4}U^4} - \frac{3,701}{10^{-5}U^5} + \frac{0,1496}{10^{-6}U^6} \right]. \quad (6.26)$$

Выражения (6.24), (6.25) и (6.26) позволяют рассчитать величину непроплава  $\ell = d - H_0$ ; контролируя интенсивность рентгеновского излучения  $J_{д}$ , ускоряющее напряжение  $U$  и ток электронного пучка  $I$  [94]. Погрешность контроля при этом составляет 5...7 % от контроли-

руемой величины. Учитывая, что величина непроплава обычно на порядок меньше глубины проплавления, точность контроля и стабилизации глубины проплавления достаточно высока и составляет 0,5...1 % от глубины проплавления  $H_0$ .

Поскольку расчет величины непроплава должен производиться в реальном масштабе времени с целью управления глубиной проплавления, а коэффициенты  $A$  и  $B$  находятся в сложной зависимости от ускоряющего напряжения, то для упрощения расчетов целесообразно сверку осуществлять при фиксированном ускоряющем напряжении. Коэффициенты  $A$  и  $B$  в этом случае определяются по формулам (6.25), (6.26) для конкретного ускоряющего напряжения. Коэффициент  $A$  при этом является постоянной величиной, а коэффициент  $B$  зависит от тока электронного пучка.

На рис. 6.10 изображена функциональная схема микропроцессорной системы контроля и стабилизации величины непроплава, работающей по изложенному принципу [25].

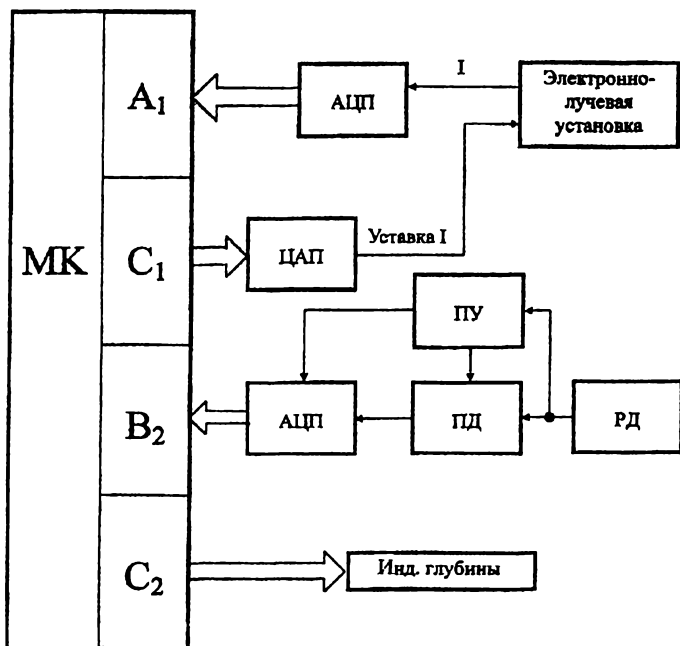


Рис. 6.10. Функциональная схема микропроцессорной системы контроля и управления глубиной непроплава с датчиком снизу: РД – рентгеновский датчик; ПД – пиковый детектор; ПУ – пороговое устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

Пиковые значения сигнала рентгеновского датчика фиксируются пиковым детектором, который запускается пороговым устройством, настроенным на уровень 0,8 от амплитуды импульсов датчика. Пиковые значения преобразуются в цифровой код и поступают через порт В<sub>2</sub> в микроконтроллер. Через порт А<sub>1</sub> в микроконтроллер поступает измеренное значение тока пучка  $I$ . В микроконтроллере информация по результатам 16-ти измерений усредняется, производится расчет величины непроплава по формуле (6.24). Измеренная величина непроплава сравнивается с заданным значением, и формируется уставка тока пучка, которая через порт С<sub>1</sub> и цифро-аналоговый преобразователь поступает в канал управления током электронно-лучевой установки. Контролируемое значение величины непроплава выводится на цифровой индикатор.

Рассмотренный способ контроля и стабилизации величины непроплава реализуется с применением вычислительной техники в связи с необходимостью проведения расчетов. На точность контроля величины непроплава влияет погрешность стабилизации ускоряющего напряжения. Устройство контроля и стабилизации можно существенно упростить, если использовать дифференциальный рентгеновский датчик, состоящий из двух рентгеновских датчиков, один из которых размещен со стороны сварочной пушки, а другой – с обратной стороны сварного шва.

На рис. 6.11 изображена функциональная схема системы стабилизации величины непроплава с дифференциальным рентгеновским датчиком.

Дифференциальный рентгеновский датчик включает в себя рентгеновские датчики РД<sub>1</sub> и РД<sub>2</sub> и устройство сравнения. Датчик РД<sub>1</sub>, расположенный с обратной стороны обрабатываемого изделия, фиксирует рентгеновское излучение зоны обработки через непровар  $\ell = d - H_0$ . Его сигнал описывается выражением (6.23).

Датчик РД<sub>2</sub> крепится на электронно-лучевой пушке так, что он может фиксировать рентгеновское излучение со дна канала проплавления. Между датчиком РД<sub>2</sub> и обрабатываемым изделием установлен фильтр 1, представляющий собой пластину определенной толщины  $\ell_\phi$  из такого же материала, как и обрабатываемое изделие. Поэтому на рентгеновский датчик РД<sub>2</sub> поступает рентгеновское излучение сварочной ванны, ослабленное фильтром 1. Интенсивность рентгеновского излучения, поступающего на датчик РД<sub>2</sub> при условии, что он имеет такой же коэффициент передачи, как и датчик РД<sub>1</sub>, описывается выражением



$$\begin{aligned}
 J_{РД2}(\varphi) = & 0,341 \cdot 10^{-37} zIK_1 \int_{-3\sigma_x}^{+3\sigma_x} \int_{-3\sigma_y}^{+3\sigma_y} \frac{1}{2\pi\sigma_x(H,\rho)\sigma_y(H,\rho)} \times \\
 & \times \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2(H,\rho)}\right] \exp\left[-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2(H,\rho)}\right] \times \\
 & \times \exp(-\alpha\rho H) K_{\Theta}(H,\rho) \int_0^{v_0} (v_0 - v) \exp[-\mu(v)\ell_{\Phi}] dx dy dv, \quad (6.27)
 \end{aligned}$$

где  $\ell_{\Phi}$  – толщина фильтра 1.

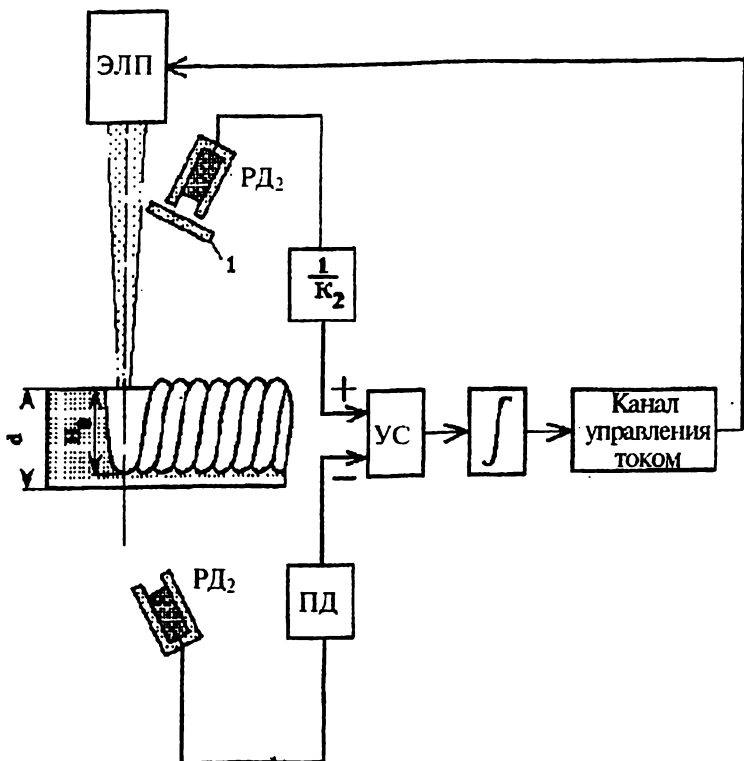


Рис. 6.11. Функциональная схема системы стабилизации глубины проплавления с дифференциальным рентгеновским датчиком: РД<sub>1</sub>, РД<sub>2</sub> – рентгеновские датчики; ПД – пиковый детектор; К<sub>2</sub> – масштабный усилитель; УС – устройство сравнения; ЭЛП – электронно-лучевая пушка; 1 – фильтр

На рис. 6.9 изображена характеристика датчика РД<sub>2</sub>, рассчитанная по формуле (6.27) без учета множителя, стоящего перед интегралом. Здесь же приводятся характеристики датчика РД<sub>1</sub> при значениях  $\ell(H_0) = \ell_\phi$ . Анализ характеристик показывает, что сигналы датчиков РД<sub>1</sub> и РД<sub>2</sub> существенно отличаются. Это объясняется тем, что для датчика РД<sub>1</sub> толщина слоя материала, поглощающего излучение, связана с геометрией канала проплавления.

Можно найти такой коэффициент  $K_2$ , на который можно разделить сигнал  $J_{РД2}$ , чтобы при определенной толщине  $\ell_\phi$  выполнялось

$$\text{бы условие } J_{РД1} = \frac{J_{РД2}}{K_2}.$$

Анализ характеристик  $J_{РД1}$  и  $J_{РД2}$  при ускоряющих напряжениях в диапазоне от 20 до 120 кВ показал, что равенство сигналов при толщине  $\ell_\phi = \ell = d - H_0 = 0,3$  см возникает при  $K_2$ , удовлетворяющем выражению

$$K_2 = 1,514 + 82,102 \exp[-0,1447U + 0,6519 \cdot 10^{-3}U^2].$$

По этому выражению можно рассчитать коэффициент  $K_2$  для любого ускоряющего напряжения в указанном диапазоне. При фиксированном ускоряющем напряжении коэффициент  $K_2$  является постоянной величиной. Система стабилизации (рис. 6.10) изменяет ток электронного пучка до тех пор, пока ошибка стабилизации  $\varepsilon = \frac{J_{РД2}}{K_2} - J_{РД1}$

не станет равной нулю.

При заданном  $K_2$  это условие выполняется лишь для одного значения величины непроплава

При заданном  $K_2$  это условие выполняется лишь для одного значения величины непроплава

$$\ell_\phi = \ell = d - H_0 = 0,3 \text{ см.}$$

Нас интересует возможность стабилизации заданной величины непроплава  $\ell$ . Для этого необходимо определить такое значение  $\ell_\phi = \ell + \Delta\ell$ , чтобы выполнялось условие

$$\frac{J_{РД2}}{K} - J_{РД1} = 0,$$

где  $\ell = d - H_0$  – заданная величина непропара;  $\Delta\ell$  – поправка, зависящая от  $\ell$ ;  $\ell_\phi$  – толщина пластины фильтра, которую необходимо установить для того, чтобы стабилизировать величину  $\ell$ .

В результате расчетов характеристик дифференциальных рентгеновских датчиков в диапазоне изменения ускоряющих напряжений от 20 до 120 кВ и изменения величины непроплава от 0,01 до 1 см поправка  $\Delta \ell$  может быть рассчитана в соответствии с выражением

$$\Delta \ell = 0,144 \ell - 0,0432.$$

Таким образом, для стабилизации заданной величины непроплава  $\ell$  в рассматриваемом способе необходимо установить фильтр из материала, одинакового с обрабатываемым изделием, толщина которого вычислена в соответствии с выражением

$$\ell_{\phi} = 1,144 \ell - 0,0432.$$

Преимущество предложенного способа стабилизации заключается в том, что в данном случае не требуется контролировать ток пучка и ускоряющее напряжение. Кроме того, повышается помехозащищенность метода за счет того, что помехи, связанные с пульсациями тока пучка, в дифференциальном датчике компенсируются. Для реализации способа не требуется применение вычислительной техники.

На рис. 6.12 изображена структурная схема системы стабилизации величины непроплава.

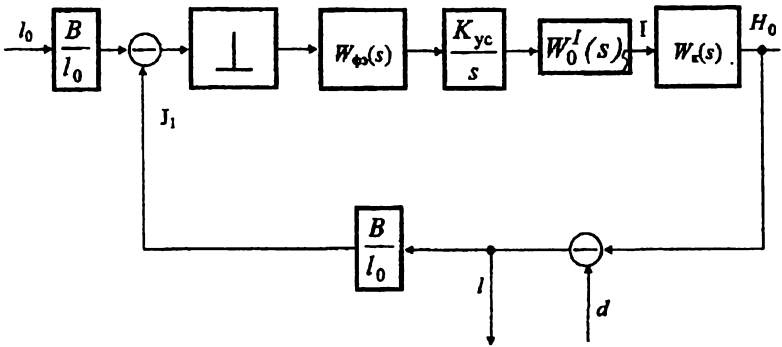


Рис. 6.12. Структурная схема системы стабилизации величины непроплава

Поскольку на элемент сравнения поступают пиковые значения сигнала рентгеновского датчика, то система является импульсной системой автоматического регулирования. Формирующий элемент является экстраполятором нулевого порядка. В качестве входного воздействия рассматривается заданное значение величины непроплава  $\ell_0$ , в качестве выходной величины – текущее значение величины непроплава  $\ell$ .

На элемент сравнения поступают сигналы рентгеновских датчиков сверху и снизу. Звено  $B/\ell_0$  соответствует линейризованному уравнению (6.24), описывающему связь между величиной непроплава и интенсивностью рентгеновского излучения, воспринимаемой датчиком. Динамическое звено  $K_{yc}/S$  соответствует введенному в контур управления интегратору, динамическое звено  $W_0'(S)$  – замкнутому каналу стабилизации тока электронного пучка.  $W_K(S)$  – передаточная функция канала проплавления, имеющая вид апериодического звена с постоянной времени, определяемой выражением (6.20).

Анализ и синтез системы стабилизации производится методами теории импульсных систем автоматического регулирования. Погрешность стабилизации связана с воздействием случайных помех и составляет 5...10 % от величины непроплава. Поскольку обычно величина непроплава на порядок меньше глубины проплавления, то погрешность стабилизации глубины проплавления оказывается достаточно малой и составляет 1...2 %.

## Глава 7

### ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛС

Представленные в предыдущих главах результаты исследований позволяют определить структуру системы и схемотехнические решения, отвечающие как общим требованиям, предъявляемым к системам автоматического управления, так и специальным, отражающим условиям их работы в технологических комплексах ЭЛС.

В Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева в течение длительного времени проводится работа по созданию систем автоматического управления ЭЛС. В результате этих исследований был разработан ряд устройств, функционирующих в соответствии с изложенными в данной работе принципами. Эти средства управления прошли эволюцию от простейших устройств контроля, помогающих оператору проводить технологический процесс; до автоматизированных вычислительных комплексов, проводящих весь процесс ЭЛС в автоматическом режиме. Важнейшим направлением совершенствования систем управления является расширение их функциональных возможностей и повышение надежности функционирования. Это достигается реализацией гибких алгоритмов управления в условиях воздействия различных возмущающих факторов. К числу таких факторов следует отнести влияние магнитных полей, вызванных остаточной намагниченностью свариваемых изделий или применением оснастки из магнитных материалов, наличие прихваток, конструктивные особенности обрабатываемых изделий, технологические особенности начала и окончания сварки и другие условия, имеющие место на практике. Обеспечить гибкую адаптацию ко всем возможным ситуациям в одной системе не представляется возможным. Поэтому реализовано несколько вариантов систем автоматического управления ЭЛС применительно к определенным типам изделий.

Повышение надежности функционирования достигается введением специальной обработки информации, поступающей от датчиков. К таким видам обработки относятся частотно-селективная фильтрация, объединенная с методом синхронного детектирования, метод синхронного накопления и определение среднего значения по результатам нескольких операций, которые рассмотрены выше.

Многие виды обработки требуют применения вычислительной техники. Поэтому современный уровень создания систем управления ЭЛС требует микропроцессорной техники. На этой технике реализуются такие устройства управления ЭЛС, как системы слежения по стыку,

управление диаметром пучка, управление глубиной проплавления. Принимая во внимание перспективность применения микропроцессорных средств, необходимо предусмотреть согласование локальных вычислительных средств в единый комплекс. В этом случае одна из локальных подсистем берет на себя функции координирующей подсистемы. Обычно такие функции целесообразно возложить на систему слежения по стыку, которая может разделять процесс ЭЛС на несколько фаз и на каждой фазе формировать управляющие воздействия на другие подсистемы.

Проведенный анализ помехозащищенности показывает, что наибольшей надежностью обладают системы слежения по стыку с предварительной записью программы на малом токе и последующем ее воспроизведением на технологическом токе электронного пучка. Такая система, при наличии средств оценки достоверности информации, позволяет оператору ввести необходимые коррективы в программу стыка. За счет этого практически исключается вероятность случайного сбоя. Контроллер микропроцессорной системы задействован в процесс обработки информации на первом этапе записи траектории стыка. На этапе воспроизведения траектории его функции в системе слежения по стыку ограничиваются лишь операциями извлечения из памяти и пересылки информации в исполнительные устройства в моменты времени, определяемые датчиком перемещения изделия. Высвободившиеся вычислительные ресурсы вполне достаточны для осуществления координации работы других подсистем комплекса. Роль оператора заключается в наблюдении за процессом и переводе системы в различные режимы работы.

Как уже отмечалось, существует несколько вариантов исполнения различных систем, которые отличаются функциональными возможностями, технологическими особенностями и сложностью. При выборе того или иного варианта системы следует исходить из технологических процессов конкретных изделий, обрабатываемого материала, наличия магнитных полей, экономической целесообразности и других обстоятельств.

### **7.1. Реализация систем слежения по стыку и фокусировки с предварительной записью программы**

На рис. 7.1 представлена функциональная схема автоматизированной системы позиционирования пучка по стыку свариваемых деталей [8; 101]. Информация о положении пучка относительно стыка выделяется методом синхронного детектирования. С помощью генератора  $\Gamma$

осуществляется формирование двух периодических составляющих: поискового синусоидального и опорного прямоугольного сигналов с частотой  $\omega_1$ . Первая составляющая через фазовращатель ФВ, сумматор  $\Sigma$  и усилитель мощности поступает в отклоняющую систему электроно-лучевой пушки и организует сканирование электронного пучка частотой  $\omega_1$  и амплитудой  $\epsilon_m$ . Вторая составляющая поступает на опорный вход синхронного детектора СД. Фазовращателем исключается сдвиг фазы между информационной составляющей сигнала коллектора вторичных электронов и опорным напряжением. Избирательный усилитель настроен на первую гармонику сигнала сканирования, т. е. на частоту  $\omega_1$ .

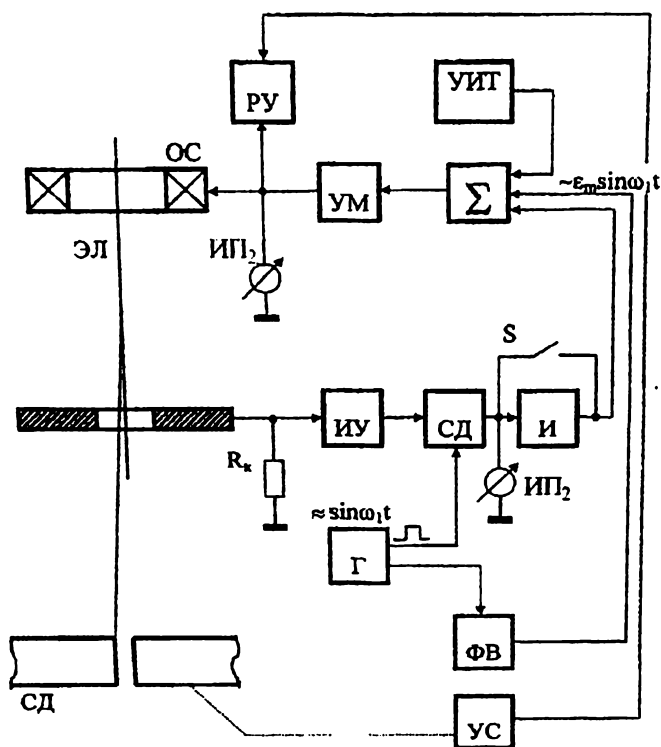


Рис. 7.1. Функциональная схема автоматизированной системы позиционирования электронного пучка по стыку свариваемой детали

Введение в контур регулирования интегратора И обеспечивает в системе астатизм первого порядка, за счет чего повышается точность регулирования. Другим положительным эффектом применения интегратора является сохранение на его выходе управляющего сигнала при

пропадании входного сигнала, имеющем место при движении над прихватками. Напряжение с интегратора через сумматор и усилитель мощности поступает в отклоняющую систему ОС электронно-лучевой пушки и управляет положением пучка относительно стыка свариваемого изделия.

Устройство работает в трех режимах: первоначальной установки пучка на стык соединения; автоматического слежения и записи программы стыка; сварки.

В первом режиме ключ  $S$  замкнут и напряжение на выходе интегратора равно нулю. В этом случае ток в отклоняющей системе определяется сигналом генератора и сигналом управляемого источника тока УИТ. С помощью последнего устанавливается пучок на стык свариваемых деталей. Контроль установки может быть осуществлен по показаниям индикаторного прибора ИП<sub>1</sub>. С помощью индикаторного прибора ИП<sub>2</sub> производится индикация отклонения пучка от оси электронно-лучевой пушки.

Во втором режиме ключ  $S$  размыкается, и система переходит в состояние автоматического слежения. При включении рабочего движения свариваемых деталей отклонение стыка фиксируется регистрирующим устройством РУ по току ОС. В качестве регистрирующего устройства применен самопишущий прибор с носителем информации на диаграммной ленте. Синхронизация движения ленты с перемещением свариваемых деталей осуществляется устройством синхронизации УС.

В третьем режиме ключ  $S$  замыкается, и система оказывается в состоянии, аналогичном первому режиму. Свариваемое изделие и диаграммная лента самописца устанавливаются в начальное положение, включается рабочее движение деталей и диаграммной ленты, вводится сварочный ток и осуществляется сварка. В процессе сварки оператор с помощью УИТ осуществляет коррекцию положения пучка, добиваясь совмещения пера самописца с линией, полученной во время записи траектории. При стандартной ширине диаграммной ленты 120 мм обеспечивается удовлетворительная точность позиционирования пучка по стыку указанным способом.

Разработан комплект документации [115] и изготовлена опытная партия систем, которые внедрены в производство на ряде предприятий. На рис. 7.2 показан общий вид описанного устройства. Впервые в России была решена проблема промышленного использования системы слежения по стыку при электронно-лучевой сварке.

Опыт производственной эксплуатации систем слежения по стыку в составе электронно-лучевых установок СУЭЛС-ПМ, СУЭЛС-4М, УЭЛС-1 при сварке крупногабаритных конструкций подтвердил пра-



вильность теоретических положений относительно математической модели вторично-эмиссионного датчика стыка и измерительного устройства, построенного по методу синхронного детектирования. В то же время выявлен ряд вопросов, касающихся необходимости участия человека, точности в условиях действия магнитных полей, повышения достоверности информации, решение которых необходимо для повышения качества сварки. Опыт промышленной эксплуатации описанной системы дал богатый экспериментальный материал.

Для автоматизации процесса воспроизведения программы коррекции положения пучка при ЭЛС разработана вторично-эмиссионная система слежения с блоком памяти на интегральных микросхемах [102]. Общий вид блока оперативного запоминающего устройства изображен на рис. 7.3. Функциональная схема системы изображена на рис. 7.4. Ее отличие от рассмотренной ранее заключается в применении оперативного запоминающего устройства, работа которого синхронизируется от датчика перемещения изделия, а также наличием в составе устройства блока индикации острого фокуса. Принцип работы блока индикации острого фокуса изложен в разд. 2.3, 2.4. Для фокусировки электронного пучка используется сигнал второй гармоники, снимаемый с коллектора вторичных электронов [3]. Острому фокусу соответствует максимум амплитуды второй гармоники.

Система состоит из шести основных функциональных блоков:

- измерительного блока 1;
- блока аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового (ЦАП) преобразователей 2;
- блока управления 3;

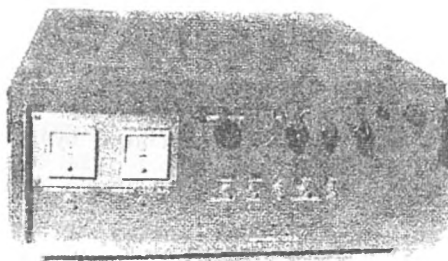


Рис. 7.2. Общий вид системы слежения по стыку

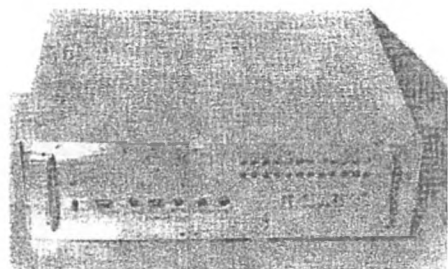


Рис. 7.3. Внешний вид блока оперативного запоминающего устройства для записи и воспроизведения программы траектории стыка

- блока записи и воспроизведения 4;
- исполнительного блока 5;
- блока фокусировки и анализа чувствительности 6.

Для определения положения стыка и фокусировки пучка применяется метод синхронного детектирования, при котором используются сигналы первой и второй гармоники соответственно.

Сигнал с выхода интегратора И поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, выполненного по схеме следящего преобразования. АЦП содержит компаратор К, тактовый генератор ТГ, схему совпадения &, счетчик импульсов СИ и АЦП. АЦП осуществляет преобразование аналогового сигнала в восьмиразрядный двоичный код. Цена младшего разряда в единицах отклонения пучка равна 0,04 мм.

Напряжение с выхода ЦАП через сумматор С и усилитель мощности поступает в отклоняющую систему ОС, которая перемещает пучок до совмещения со стыком сварного соединения.

Блок фокусировки и анализа чувствительности используется для контроля острой фокусировки электронного пучка и оценки работоспособности системы слежения. Уровень второй гармоники контролируется по прибору ИП<sub>2</sub>.

Система работает в трех режимах: наведения пучка на стык и фокусировки; записи траектории стыка; воспроизведения.

В первом режиме, за счет шунтирования интегратора И переключателем  $S_1$ , сигнал на выходе И равен нулю, и, следовательно, сигнал на выходе ЦАП также равен нулю. Наведение сканирующего пучка на стык осуществляется с помощью механизма перемещения или задающего устройства ЗУ, которое устанавливает начальный ток отклоняющей системы.

В режиме записи траектории стыка переключатель  $S_1$  размыкает интегратор И, и система переходит в режим слежения. В блок запоминания 4 поступает цифровая информация о положении стыка. Оперативное запоминающее устройство емкостью 1024 байт выполнено на интегральных микросхемах К176РУ2.

Управление записью осуществляется с помощью блока управления 3, в состав которого входят датчик перемещения ДП свариваемых деталей, формирователь управляющих импульсов ФИ, счетчик адресных импульсов СА и устройство сброса УС.

В режиме рабочего движения свариваемых деталей датчик перемещения формирует импульсы, определяющие положение свариваемого изделия, которые преобразуются формирователем импульсов в управляющие сигналы запрета, смены адреса и разрешения записи. Сигнал запрета поступает на схему совпадения &, обеспечивая посто-

яство информации на входе ОЗУ во время записи. Адресные импульсы через счетчик адреса формируют адрес ОЗУ. Импульсы разрешения записи, сдвинутые во времени относительно адресных импульсов, поступают на вход «Разрешение» ОЗУ.

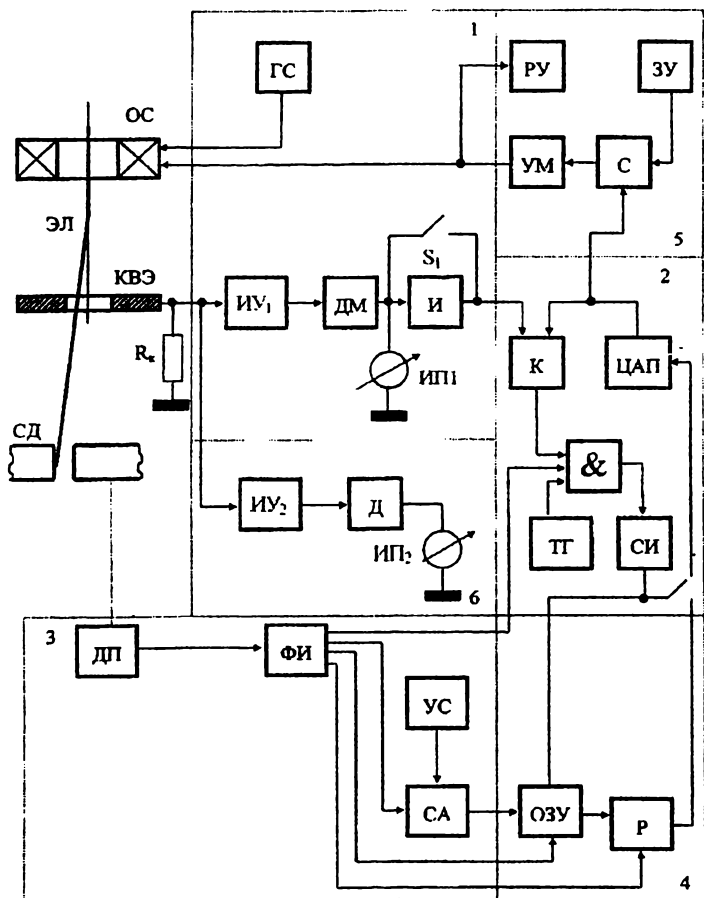


Рис. 7.4. Функциональная схема вторично-эмиссионной системы слежения по стыку с блоком памяти

В режиме воспроизведения переключатель  $S_2$  устанавливается в соответствующее положение. При этом формирователь импульсов вырабатывает сигналы разрешения считывания информации из ОЗУ и записи в регистр Р, с выхода которого информация поступает в ЦАП.

В системе используется регистрирующее устройство РУ, в качестве которого применен самопишущий прибор НЗ39. РУ позволяет наблюдать траекторию стыка в процессе записи и воспроизведения. Диаграммные ленты могут быть использованы в системе контроля качества сварки.

Конструктивно система реализована в виде двух блоков: измерительно-преобразовательного блока (рис. 7.2) и блока памяти с устройством управления (рис. 7.3).

Испытания системы были проведены в производственных условиях при сварке на электронно-лучевых установках СУЭЛС-IV и СУЭЛС-ИМ. Система внедрена в производство.

В тех случаях когда расстояние от пушки до поверхности свариваемого изделия не является постоянным, должна осуществляться автоматическая фокусировка. Как отмечалось в разд. 2.4, для автоматической фокусировки можно использовать составляющие сигнала с частотами  $2\omega_1 \pm \omega_2$ , где  $\omega_1$  – частота сканирования по стыку;  $\omega_2$  – частота сканирования по фокусу. На рис. 7.5 изображена функциональная схема системы автоматического слежения по стыку и фокусировки [9]. Сигнал сканирования стыка лучом с частотой  $\omega_1$  формируется первым задающим генератором ЗГ<sub>1</sub>, имеющим частоту генерации  $2\omega_1$ , делителем Д частоты на два, который через первый сумматор  $\Sigma_1$  поступает в отклоняющую систему ОС.

Сигнал сканирования фокуса создается модулятором М и фильтром Ф и через второй сумматор  $\Sigma_2$  подается в фокусирующую систему ФС. При этом на выходе модулятора формируется составляющая сигнала с разностной частотой  $\omega_2 = (2\omega_1 + \omega_2) - 2\omega_1$ , где  $2\omega_1 + \omega_2$  – частота генерации второго задающего генератора.

При выполнении условия  $\omega_1 \gg \omega_2$  во вторично-эмиссионном датчике возникают составляющие с боковыми частотами  $2\omega_1 \pm \omega_2$ . Одна из них с частотой  $2\omega_1 + \omega_2$  выделяется избирательным усилителем и детектируется синхронным детектором, на опорный вход которого поступает напряжение с генератора ЗГ<sub>2</sub> с частотой  $2\omega_1 + \omega_2$ . Далее напряжение постоянного тока, пропорциональное величине расфокусировки пучка, через интегратор И, блок управления БУ и второй сумматор поступает в фокусирующую систему.

Система слежения по стыку работает по принципу выделения первой гармоники. Работа системы в режимах записи траектории и сварки аналогична работе приведенных выше устройств. Дополнительным здесь является осуществление записи программы фокуса с помощью ОЗУ<sub>2</sub>.



няющей системы должна осуществляться в различных кабелях при условии их экранировки. Могут быть использованы и различные способы компенсации указанной помехи.

Практика использования систем слежения по стыку показала, что существенное влияние на их работоспособность оказывают прихватки. При движении над прихваткой чувствительность датчика к стыку резко снижается, а уровень помех может возрасти, особенно в тех случаях, когда прихватка не обработана механически и имеет неровности. В этом случае система слежения теряет стык. Поэтому она должна иметь элементы адаптации к таким помехам, как прихватка. Аналогичное влияние оказывают пережатие стыка, когда зазор в стыке становится значительно меньше диаметра пучка. В этом случае чувствительность измерительного устройства меняется в зависимости от отношения величины зазора в стыке к диаметру пучка. На прихватке чувствительность падает до нуля. Одним из эффективных методов устранения сбоев при движении над прихватками является блокировка устройства при низкой чувствительности [11]. Когда амплитуда второй гармоники падает ниже порогового уровня, ключ, управляемый от компаратора, размыкает цепь управления и вход интегратора соединяет с нулем. Отклонение пучка при этом сохраняется прежним. После прохождения прихватки прерванная обратная связь в системе возобновляется.

Микропроцессорные средства позволяют выполнять различные вычислительные и логические функции, запоминание и обработку информации, поэтому логично использовать их в системах слежения по стыку. Поэтому была разработана микропроцессорная система слежения по стыку и фокусировки электронного пучка [103; 110]. Функциональная схема системы представлена на рис. 7.6. Система состоит из трех основных каналов: фокусировки пучка и анализа чувствительности; позиционирования пучка по стыку; измерения и компенсации влияния магнитного поля с феррозондовым датчиком.

Контроль положения стыка в рассматриваемой системе реализован по методу синхронного детектирования с выделением информации на первой гармонике частоты сканирования пучка. Для этого задающим генератором формируется синусоидальное напряжение сканирования стыка пучком частотой 4 кГц и опорное напряжение (меандр той же частоты) демодулятора ДМ<sub>1</sub>. Задающий генератор ЗГ<sub>1</sub> представляет собственно генератор с кварцевой стабилизацией частоты 96 кГц и делителей частоты для формирования:

- сканирования стыка пучком (4 кГц);
- опорного сигнала ДМ<sub>1</sub> (4 кГц);

- опорного сигнала ДМ<sub>2</sub> (8 кГц);
- возбуждения феррозонда (24 кГц);
- опорного сигнала ДМ<sub>3</sub> (48 кГц).

Опорные сигналы имеют форму меандра, остальные – синусоидальную форму.

Канал позиционирования пучка по стыку состоит из коллектора вторичных электронов КВЭ, избирательного усилителя ИУ<sub>1</sub>, демодулятора ДМ<sub>1</sub>, цифрового интегратора И<sub>1</sub> и регистра Р<sub>1</sub>. Цифровой интегратор представляет собой последовательное соединение преобразователя напряжение–частота и реверсивного счетчика. Реализация реверсивного счетчика исключает его переполнение и последующий сброс.

Устойчивость системы слежения по стыку достигается выбором общего коэффициента усиления путем изменения коэффициента преобразователя напряжение–частота [116].

Канал фокусировки пучка и анализа чувствительности состоит из избирательного усилителя второй гармоники ИУ<sub>2</sub>, демодулятора ДМ<sub>2</sub> и аналого-цифрового преобразователя. В системе этот канал используется для контроля острого фокуса по максимуму второй гармоники. При этом изменение фокусировки осуществляется оператором через регулируемый источник питания РИП и усилитель мощности УМ<sub>4</sub>. Уровень второй гармоники как показатель чувствительности измерительного устройства используется в микроконтроллере для переключения режима работы системы при движении над прихватками и пережатии стыка, когда вероятность сбоя системы слежения становится ощутимой.

Система работает в трех режимах: настройки на стык; записи программы стыка на малом токе; воспроизведения программы на рабочем токе.

Программа траектории стыка записывается в 1024 ячейках ОЗУ. Моменты записи и воспроизведения программы формируются датчиком перемещения изделия ДП.

В гл. 4 дается рекомендация, по которой для повышения помехоустойчивости измерительного устройства контроля положения стыка следует выполнять сканирование электронного пучка вдоль стыка с амплитудой 5...6 мм. Для этой цели используется задающий генератор пилообразного напряжения ЗГ<sub>2</sub> и усилитель мощности УМ<sub>3</sub>. Введение продольного сканирования электронного пучка при записи программы траектории стыка повышает помехозащищенность и точность слежения по стыку.

Алгоритм работы контроллера МК предусматривает режимы записи программы, обработки информации и воспроизведения траекто-

рии стыка на рабочем токе электронного пучка. Переключение режимов работы осуществляется оператором.

В режиме записи программы реализуется автоматическое слежение за стыком. Для этой цели цифровой сигнал о положении пучка относительно стыка через порт В<sub>2</sub>, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП<sub>1</sub> и усилители мощности УМ<sub>1</sub> и УМ<sub>2</sub> поступает в отклоняющие катушки ОК<sub>1</sub> и ОК<sub>2</sub>, которые реализуют в данном случае плоскопараллельное перемещение пучка до совмещения его со стыком. В этом режиме осуществляется запись программы траектории стыка в ОЗУ. После записи информации по всем 1024-м точкам индицируется сообщение «Конец записи». В дальнейшей работе возможен реверс перемещения детали или электронно-лучевой пушки.

В режиме обработки информации происходит линейное интерполирование участков траектории, имеющих чувствительность датчика ниже порогового уровня, по следующему алгоритму

$$\Delta x = \frac{x_k - x_i}{n + 1},$$

где  $x_k$  и  $x_i$  – записанные координаты пучка, в промежутках между которыми исчезла чувствительность;  $n$  – количество импульсов с датчика перемещения за время прохождения участков с низкой чувствительностью. Координаты участка интерполирования рассчитываются по формуле

$$x_{i+k} = x_i + k\Delta x, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

После обработки информации происходит перезапись программы на участках с низкой чувствительностью.

Другой целью обработки является определение показателя достоверности информации

$$C = \frac{N_i}{1024},$$

где  $N_i$  – количество точек траектории, для которых чувствительность выше порогового значения.

При показателе достоверности информации  $C < 0,7$  оператору целесообразно осуществить воспроизведение траектории стыка на малом токе пучка с контролем процесса с помощью средств наблюдения и при необходимости перезаписать программу.

Алгоритм и программа микроконтроллера предусматривает отображение траектории стыка и показателя текущей чувствительности измерительного устройства на экране дисплея с перемещением изо-



бражения синхронно с перемещением свариваемого изделия. Это позволяет наблюдать процесс записи и воспроизведения траектории стыка, а также исправление программы после обработки информации.

Канал измерения и компенсации влияния магнитного поля предназначен для устранения погрешности позиционирования электронного пучка по стыку в корне шва от остаточной намагниченности свариваемого изделия [108]. В основе канала лежит цифровой измеритель магнитного поля с феррозондовым датчиком ФД. Для линейности статической характеристики измеритель построен по компенсационной схеме [56]. Конструктивные и принципиальные электрические параметры феррозондового датчика выбраны в соответствии с рекомендациями работ [90; 92]. Обмотка возбуждения запитывается синусоидальным напряжением частотой 24 кГц с задающего генератора ЗГ<sub>1</sub>. В измерительной обмотке наводится сигнал второй гармоники, пропорциональный измеряемому магнитному полю. Эта ЭДС выделяется избирательным усилителем ИУ<sub>3</sub>. Усиленный сигнал детектируется демодулятором ДМ<sub>3</sub> и поступает в цифровой интегратор И<sub>2</sub>. Обратная связь формируется цифро-аналоговым преобразователем ЦАП<sub>2</sub> и усилителем мощности УМ<sub>5</sub>, создающем ток  $I_k$ , протекающий в компенсационной обмотке феррозонда. Ток в компенсационной обмотке создает магнитное поле, компенсирующее измеряемое магнитное поле. На выходе цифрового интегратора получается цифровой аналог измеряемого магнитного поля, который через регистр Р<sub>2</sub> поступает в порт А<sub>1</sub> контроллера. Феррозондовый датчик размещается в промежутке между пушкой и свариваемым изделием на определенной высоте, при которой угол  $\Psi$  между касательной и траекторией от неоднородного магнитного поля остаточной намагниченности равен углу от однородного поля, величина которого контролируется феррозондовым датчиком. В этом случае угол  $\Psi$  может быть рассчитан по формуле [22]

$$\Psi = \frac{e}{mV} \int_0^z B(z) dz = \frac{e}{mV} Bz,$$

где  $z$  – расстояние от пушки до обрабатываемого изделия.

Феррозонд ориентирован так, что его ось чувствительности находится в плоскости стыка перпендикулярно оси электронно-лучевой пушки. В этом случае он измеряет составляющую магнитного поля, приводящую к отклонению электронного пучка относительно стыка. Погрешность позиционирования в корне шва будет отсутствовать, если угол наклона траектории пучка  $\Psi_{\Sigma} = \Psi - \Psi_1 = 0$  (рис. 4.3). Это условие достигается, если магнитное поле помехи компенсируется эквивалент-

ным магнитным полем, создаваемым в отклоняющей системе. Для этой цели с порта В<sub>1</sub> через цифро-аналоговый преобразователь ЦАП<sub>4</sub> вводится управляющее напряжение  $U_{к\psi}$ , которое через сумматор и усилитель мощности УМ<sub>2</sub> создает в отклоняющей системе ОК<sub>2</sub> магнитное поле, компенсирующее влияние поля помехи по углу отклонения. Возникающее при этом отклонение электронного пучка от стыка обрабатывается системой позиционирования через сигнал  $U_{п}$ . Можно выбрать такое расстояние  $l_2$  от отклоняющей системы ОК<sub>2</sub> до свариваемого изделия, при котором вместе с компенсацией угла наклона траектории также достигается и компенсация отклонения электронного пучка от действия магнитного поля. В этом случае  $l_2 = X / \psi$ . Для случая действия магнитного поля, вызванного остаточной намагниченностью деталей (пример 2 в разд. 4.2),  $l_2 = 62$  мм. Программа отработки угла  $\psi$  записывается в ОЗУ контроллера аналогично программе отклонения стыка. В процессе проведения сварки в результате теплового воздействия может измениться поле намагниченности изделия. Поэтому в процессе сварки производится контроль магнитного поля, его текущее значение отстает на компенсацию угла  $\psi$ , а по разности текущих и записанных в ячейки ОЗУ значений вырабатывается сигнал  $U_{к\psi}$ , осуществляющий корректировку перемещения пучка, вызванную приращением магнитного поля.

В случае если отклоняющая система ОК<sub>2</sub> установлена на оптимальном расстоянии  $l_2$ , корректировка по положению стыка не требуется.

Для осуществления плоскопараллельного перемещения пучка разработана конструкция отклоняющей системы на базе электронно-лучевой пушки КЭП-2М. На рис. 7.7 представлена анодная часть электронно-лучевой пушки с закрепленным на ней феррозондовым датчиком.

В функциональную схему системы введена модель М, с помощью которой осуществляется имитация датчика отклонения стыка. Модель позволяет производить отладку системы и контроль ее работоспособности без включения электронно-лучевого оборудования.

Конструктивно система выполнена в виде стойки (рис. 7.8), в которую входят три блока: блок цифровой части, аналоговый блок и блок источников питания. На столе стойки установлено видеоконтрольное устройство.

В состав блока цифровой части входят плата микроконтроллера «Электроника МС2702» («Электроника К1-20»), АЦП, ЦАП, устройства управления, ОЗУ, интерфейс связи с пультом управления. На переднюю панель выведены органы управления режимами работы (кнопки: «Поиск», «Запись», «Сварка», «Установка нуля адреса», «Включение модели»).

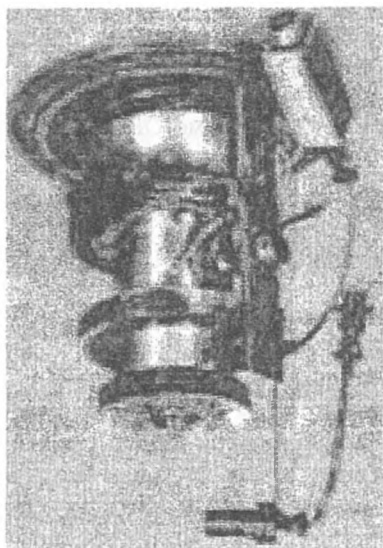


Рис. 7.7. Доработанная конструкция анодной части ЭЛП КЭП-2М с феррозондовым датчиком

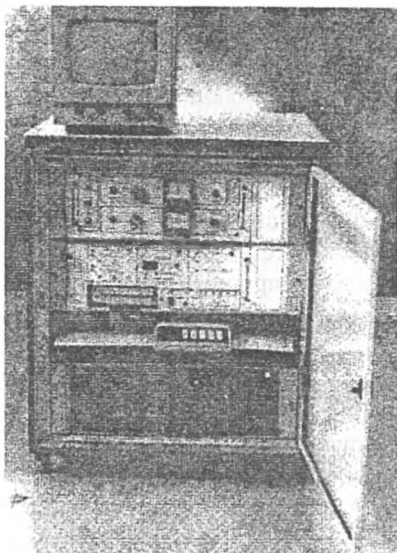


Рис. 7.8. Общий вид микропроцессорной системы автоматического слежения и фокусировки электронного пучка

В состав аналогового блока входят избирательные усилители, генераторы, усилители мощности, демодуляторы. На передней панели блока установлены необходимые органы управления и приборы индикации величин регулируемых параметров.

На видеоконтрольном устройстве и панелях аналогового и цифрового блока индицируются следующие параметры:

- отклонение стыка;
- отклонение пучка;
- амплитуда второй гармоники;
- напряженность магнитного поля;
- параметр достоверности информации  $S$ ;
- перемещение изделия (1024 точки).

В качестве датчика перемещения изделия использован фотоэлектрический датчик роторного типа ВЕ-178. Датчик дает 1024 импульсов на оборот вала. Наличие на выходах датчика последовательностей импульсов, сдвинутых на  $90^\circ$ , позволяет распознать направление вращения и формировать соответствующие сигналы управления. Разработан комплект технической документации на микропроцессорную систему слежения по стыку, техническое описание и инструкция по эксплуата-

ции, алгоритмы функционирования и программное обеспечение. Для получения высокого быстродействия системы, работающей в реальном масштабе времени, программирование микроконтроллера произведено на ассемблере. Программа размещена в постоянном перепрограммируемом запоминающем устройстве (ППЗУ) на микросхемах К573РФ2 емкостью 2 килобайта. Для программирования были использованы кросс-средства [54; 69].

Испытания микропроцессорной системы проводились в лабораторных и производственных условиях. Целью лабораторных испытаний являлась оценка адекватности математической модели, описывающей метод синхронного детектирования, а также проверка работоспособности и точности системы в условиях действия различных помех.

Испытания проводились на электронно-лучевой установке ЭЛУ-9Б с источником питания У250А и электронно-лучевой пушкой КЭП-2М. Сваривались кольцевые образцы из сплавов АМг6 и ЭИ654 диаметром 400 мм и толщиной до 30 мм. С помощью колец Геймгольца вводилось магнитное поле в рабочем пространстве в направлении, совпадающем с направлением стыка. Искусственно вводились биения стыка до  $\pm 5$  мм.

Испытания проводились следующим образом. При сварке немагнитного материала (сплав АМг6) в отсутствие магнитного поля производилась запись программы в режиме слежения при токе пучка 5 мА. Затем система переводилась в режим воспроизведения, и осуществлялась сварка.

В других случаях вводились магнитные поля напряженностью 50, 150, 250 А/м, а канал компенсации магнитного поля отключался. Производилась запись и сварка. Затем включался канал компенсации влияния полей при тех же значениях биения стыка и магнитных полей. Производилась запись программы стыка и сварка. Образцы были собраны из колец, соединенных прихватками с помощью аргоно-дуговой сварки.

Аналогичные испытания проводились с кольцевыми образцами из сплава ЭИ654. В этом случае имела место остаточная намагниченность образцов с напряженностью поля на поверхности до 60 А/м.

Оценка адекватности математической модели проводилась путем измерения амплитуд первой и второй гармоники на выходе соответствующих избирательных усилителей и демодуляторов при проведении операции настройки пучка на стык. Точность совмещения электронного пучка со стыком определялась по микрошлифам сварных соединений, а также методами радиографического и ультразвукового контроля.

На рис. 7.9 представлены фотографии микрошлифов, характеризующие расположение сварного шва относительно стыка при различных режимах сварки при наличии и отсутствии слежения за стыком.

Производственные испытания системы проводились на установке СУЭЛС-IV при сварке изделий.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Анализ зависимостей первой и второй гармоник от смещения стыка показал, что эти зависимости хорошо соответствуют расчетным характеристикам.

2. Испытания подтвердили работоспособность микропроцессорной системы во всех режимах ее работы.

3. Погрешность позиционирования электронного пучка по стыку не превышает 0,2 мм.

4. Наличие канала компенсации влияния магнитного поля существенно уменьшает погрешность позиционирования в корне шва при сварке изделий с остаточной намагниченностью или другими магнитными помехами.

5. Система позволяет повысить качество сварных соединений, предотвратить дефекты типа непровара, улучшить условия работы оператора, повысить наблюдаемость процесса.

6. Производственные испытания системы выявили один недостаток – необходимость питания от автономного источника, так как присущий электронно-лучевому оборудованию большой уровень импульсных помех приводил к сбоям микропроцессора.

## 7.2. Реализация слежения по стыку на рабочем токе

Следующим этапом технического развития средств автоматического позиционирования является применение разработанных схемотехнических решений для создания системы слежения за стыком и фокусом непосредственно в процессе сварки. Представленные в пре-

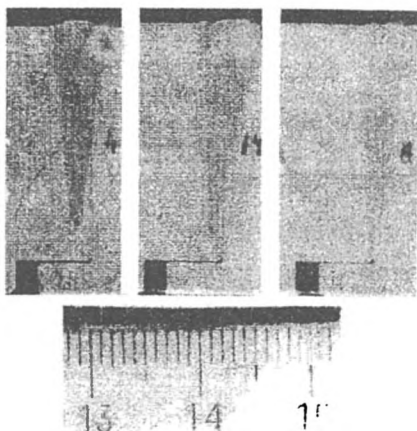


Рис. 7.9. Микрошлифы сварных швов, выполненных при различных режимах ЭЛС: а – без слежения; б – со слежением без компенсации магнитного поля; в – со слежением и компенсацией магнитного поля

дыдущих главах результаты исследований показывают возможность создания такой системы, обеспечивающей требуемую помехоустойчивость. Как уже отмечалось, метод синхронного детектирования для слежения за стыком на рабочем токе не применим, поэтому в этом случае используется кратковременный вывод пучка из зоны сварки и реализация развертывающего преобразования. Исследования, описанные в гл. 4, показывают, что наилучшие показатели помехоустойчивости и надежности дает использование коллимированного рентгеновского датчика и обработка информации методом синхронного накопления. Данный метод не только повышает достоверность принятого сигнала от стыка, но и сохраняет его информативность, что позволяет использовать форму сигнала от стыка для контроля фокусного расстояния.

Реализация метода синхронного накопления не возможна без применения вычислительных средств. Анализ алгоритма работы и вычислительных операций показывает, что с этими задачами могут успешно справиться микропроцессорные средства. Сравнение различных вариантов реализации системы слежения за стыком и фокусом позволило сделать вывод о целесообразности следующего распределения функций между программными и аппаратными средствами: формирование траектории сканирования, усиление сигнала от стыка, управление положением пучка и фокуса производится аппаратными средствами; распознавание полезного сигнала, сглаживание случайных помех, расчет требуемой коррекции положения пучка и фокуса, индикация состояния системы – программными средствами.

Функциональная схема системы представлена на рис. 7.10 и 7.11 [97]. Система состоит из трех основных блоков: блока выброса пучка, измерительного блока, блока коррекции и индикации. Управляет работой микропроцессорной системы микропроцессорный контроллер МК, который связан с внешними устройствами через шесть портов (А, В, С, А<sub>1</sub>, В<sub>1</sub>, С<sub>1</sub>), входящих в состав контроллера, а также через внутреннюю шину данных (ШД), шину адресов (ША) и шину управления (ШУ).

Блок выброса пучка осуществляет его вывод из сварочной ванны, пересечение пучком стыка в прямом и обратном направлении вдоль зоны обзора коллимированного рентгеновского датчика. Развертка пучка производится цифровым генератором по 512-ти точкам. Генератор тактовых импульсов ГТИ через счетчик СЧ<sub>1</sub> выставляет на адресный вход постоянных запоминающих устройств ПЗУ<sub>x</sub> и ПЗУ<sub>y</sub> последовательность адресов ячеек памяти, в которых записаны координаты траектории сканирования пучка. Последовательности кодовых комбинаций с помощью цифро-аналоговых преобразователей ЦАП<sub>x</sub> и ЦАП<sub>y</sub> преобразуются в аналоговые сигналы, которые через усилители мощ-

ности  $УМ_x$  и  $УМ_y$  поступают в отклоняющие системы  $ОС_x$  и  $ОС_y$ , реализующие требуемое сканирование электронного пучка. Блок выброса пучка запускается с контроллера сигналом «ЗАП» и останавливается сигналом «Стоп», который организуется счетчиком  $СЧ_1$  после выборки всех адресов  $ПЗУ_x$  и  $ПЗУ_y$ .

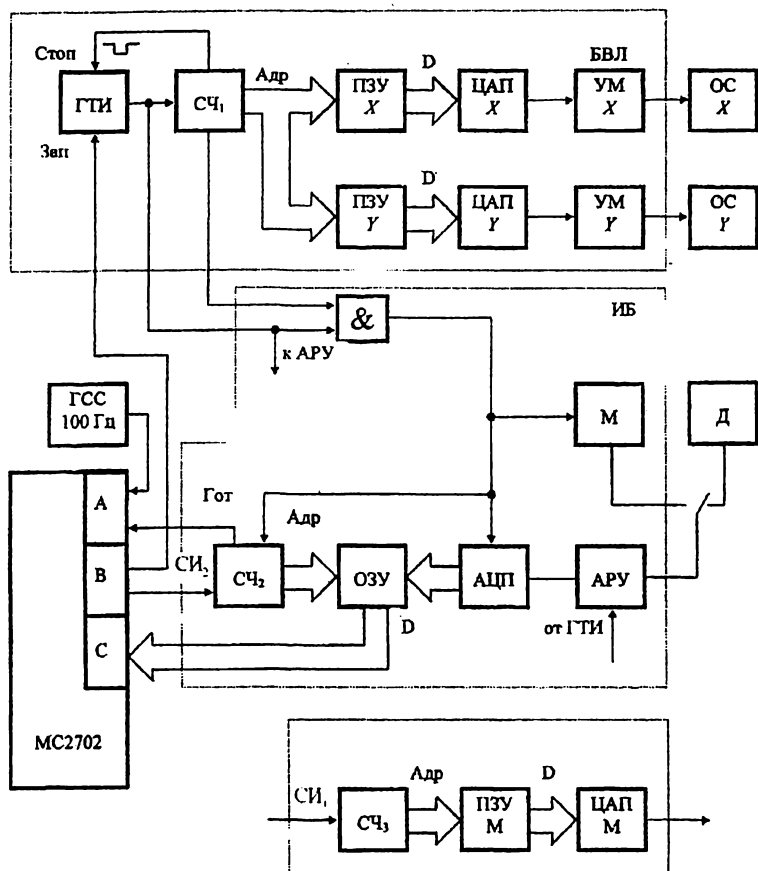


Рис. 7.10. Функциональная схема системы слежения за стыком и фокусом пучка (блок выброса пучка, измерительный блок, модель)

С целью уменьшения влияния помех работа системы синхронизируется от питающей сети. Синхронизация производится генератором синхронизации сети ГСС путем подачи прямоугольных импульсов на одну из линий порта А. Импульс синхронизации образуется в тот мо-

мент, когда амплитуда сетевого напряжения становится максимальной. При этом пульсация тока электронного пучка минимальна. Частота импульсов синхронизации – 100 Гц.

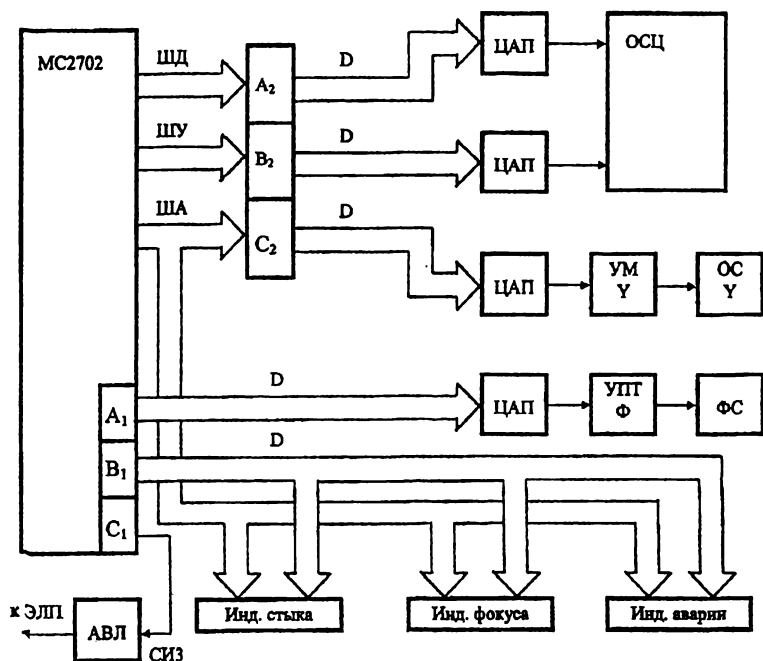


Рис. 7.11. Функциональная схема системы слежения за стыком и фокусом пучка (блок коррекции и индикации)

В измерительном блоке осуществляется преобразование сигнала датчика стыка  $D$  аналого-цифровым преобразователем АЦП. Аналоговый сигнал с датчика попадает на АЦП через схему автоматической регулировки усиления АРУ. Схема АРУ предназначена для компенсации постоянной составляющей и стабилизации амплитуды сигнала при изменении технологических параметров электронного пучка. Функциональная схема и принцип действия АРУ изложены в разд. 5.3.

Измерения сигнала датчика стыка производятся в каждой точке траектории пучка при пересечении им стыка в прямом и обратном направлении. Работа блока синхронизируется синхроимпульсами СИ<sub>1</sub>, поступающими из блока выброса пучка. С целью повышения помехоустойчивости измерительный блок работает только в момент наибольшей вероятности появления сигнала от стыка. Это достигается подачей



сигнала счетчиком СЧ<sub>1</sub> на логическую схему И, разрешающую прохождение СИ<sub>1</sub> от ГТИ до АЦП в моменты пересечения пучком стыка. Коммутация адресов ячеек ОЗУ производится счетчиком СЧ<sub>2</sub> при поступлении тактовых импульсов СИ<sub>1</sub>. После заполнения ОЗУ измерительный блок формирует сигнал готовности «ГОТ», предупреждающий контроллер о готовности измерительного блока к передаче информации.

Для считывания сигнала из ОЗУ контроллер организует передачу синхрои́мпульсов СИ<sub>2</sub> по линии порта В на счетчик СЧ<sub>2</sub>. Счетчик организует адреса ячеек ОЗУ. Содержание ячеек выставляется на шину данных ОЗУ и считывается контроллером через порт С.

Для проверки функционирования в состав измерительного блока введена схема М, моделирующая сигнал от стыка. В состав модели М входят счетчик СЧ<sub>3</sub>, ПЗУ<sub>м</sub> и ЦАП<sub>м</sub>. В ячейках ПЗУ<sub>м</sub> записаны кодовые комбинации, соответствующие сигналу от стыка. Тактируется работа модели М синхрои́мпульсами СИ<sub>1</sub>. Модель подключается к измерительному блоку с помощью ключа S<sub>1</sub>.

Блок коррекции и индикации предназначен для визуального контроля величины отклонения оси пучка от стыка, сигнализации аварийных режимов работы. Блок позволяет визуально оценить форму сигнала от стыка и осуществлять коррекцию положения пучка относительно стыка, изменять фокус пучка, производить аварийный вывод тока пучка. Форма сигнала от стыка визуально оценивается на экране осциллографа ОСЦ. На один вход осциллографа подается сигнал развертки траектории сканирования, на другой – сигнал от стыка, соответствующий этой развертке. Выдача всех управляющих воздействий осуществляется контроллером путем подачи цифровых сигналов через порты А<sub>2</sub>, В<sub>2</sub> и преобразования их в аналоговую форму соответствующими ЦАП. Коррекция положения пучка относительно стыка производится через внешний порт С<sub>2</sub> с последующим преобразованием сигнала в аналоговую форму, суммированием его в усилителе УМ<sub>у</sub> и воздействием на отклоняющую систему ОС<sub>у</sub>. Коррекция фокуса производится через порт А<sub>1</sub> с помощью изменения тока фокусирующей системы ФС. Индикация отклонения от стыка и фокусировка пучка производится семи-сегментными индикаторами, которые управляются с помощью регистров. Информация в регистры заносится из контроллера через порт В<sub>1</sub>. Каждый регистр адресуется через шину адреса контроллера.

Аварийный вывод тока пучка производится схемой АВЛ по команде контроллера в случае потери сигнала от стыка или при сбое программы. Схема работает следующим образом. По одной из линий порта С<sub>1</sub> на схему АВЛ поступают импульсы СИ<sub>3</sub>, которые характеризуют

нормальный режим работы системы. При постоянном получении этих импульсов схема находится в состоянии блокировки. Если импульсы в схему АВЛ не поступают, она разблокировывается, происходит программное уменьшение тока пучка и прекращение сварки.

Рассмотрим алгоритм функционирования системы. Блок-схема алгоритма работы контроллера в составе системы слежения изображена на рис. 7.12, 7.13. Начальная установка заключается в настройке портов контроллера для задания направления обмена информацией. Полученную из ОЗУ измерительного блока информацию контроллер хранит в специально отведенной области памяти – ячейках-накопителях. Перед началом каждого цикла измерений накопители очищаются. Затем контроллер переходит в режим ожидания синхроимпульса сети. При поступлении синхроимпульса контроллер организует сигнал «ЗАП» и переходит в режим ожидания сигнала «ГОТ», который должен появиться через 0,1 мс. Если он не появляется, то это означает, что измерительный блок неисправен, и контроллер организует индикацию аварийного режима и запускает схему аварийного вывода тока пучка.

Если сигнал «ГОТ» поступает через 0,1 мс, то контроллер переходит к считыванию информации из ОЗУ измерительного блока. С этой целью контроллер по одной из линий порта В посылает в счетчик СЧ<sub>2</sub> измерительного блока синхроимпульс. Данные из ОХУ измерительного блока считываются контроллером через порт С и складываются с содержимым ячейки-накопителя. Затем адрес накопителя меняется и производится новое считывание. Всего считываются 128 чисел, после чего контроллер переходит в режим ожидания синхроимпульса сети. После поступления синхроимпульса организуется новый цикл сканирования и считывания информации. После завершения шестнадцати таких циклов контроллер переходит к программе обработки сигнала в накопителях.

Обработка производится в следующем порядке. Сигнал от стыка нормируется путем деления каждой шестнадцатиразрядной ячейки накопителя на масштабный коэффициент  $K_{\text{мас}}$ , который преобразует максимальное значение амплитуды  $A_{\text{max}}$  в число 256:

$$K_{\text{мас}} = \frac{A_{\text{max}}}{256}.$$

Затем определяется разность  $A$  между максимальным и минимальным значениями амплитуды сигнала от стыка. Эта разность является критерием достоверности сигнала от стыка. Если  $A \leq 0,1A_{\text{max}}$ , то принятый сигнал не достоверен. В этом случае контроллер принимает решение о том, что произошел сбой. Наиболее вероятной причиной

сбоя может быть наличие прихватки. С целью распознавания этой ситуации анализируется количество сбоев. Если число сбоев меньше заданного значения  $n$ , то процесс слежения возобновляется. Число допустимых сбоев зависит от скорости сварки и длины прихваток.

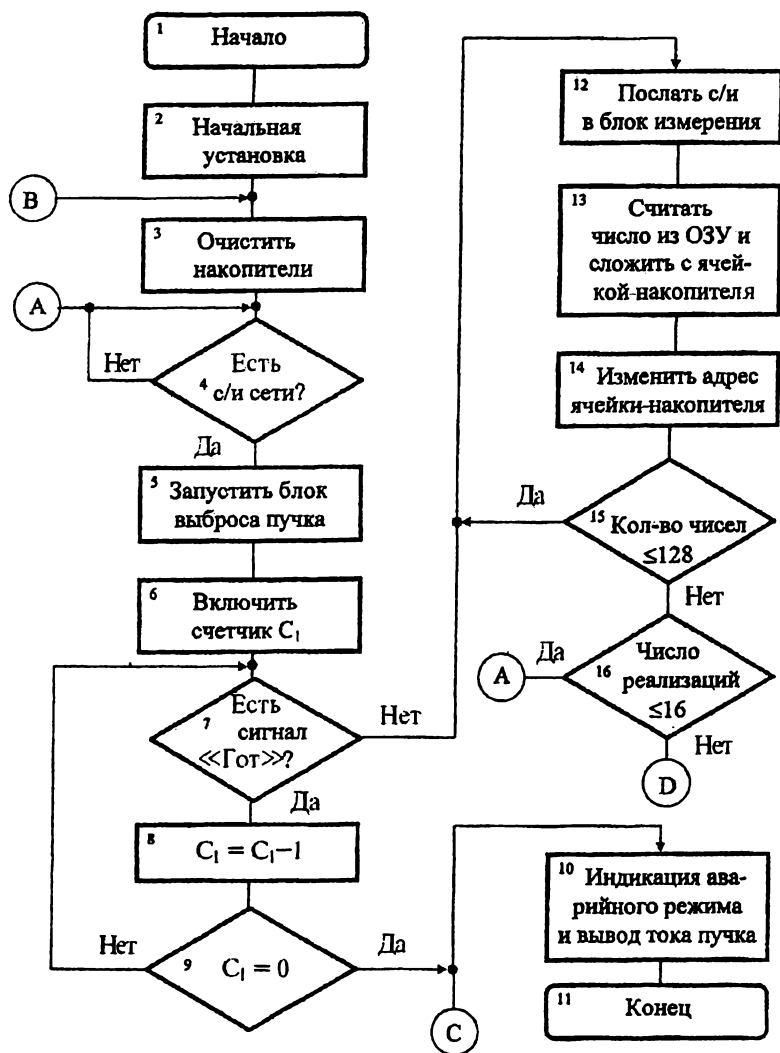


Рис. 7.12. Блок-схема алгоритма работы контроллера в составе микропроцессорной системы слежения с коллимированным рентгеновским датчиком

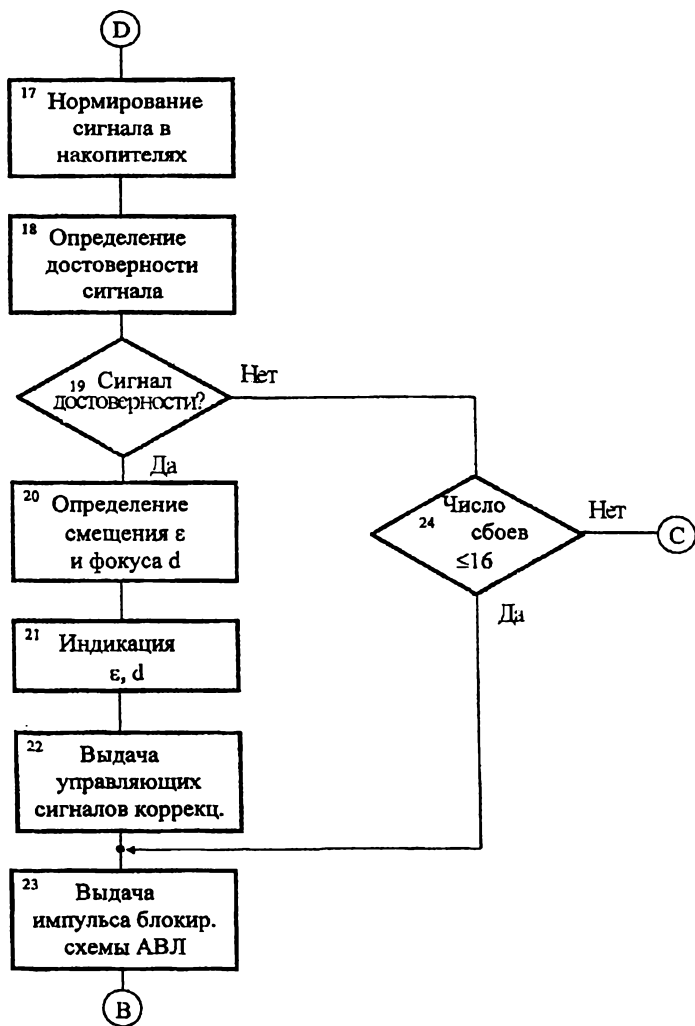


Рис. 7.13. Блок-схема алгоритма работы контроллера в составе микропроцессорной системы слежения с коллимированным рентгеновским датчиком (продолжение)

Если принятый сигнал достоверен, то производится определение величин смещения  $\epsilon$  относительно стыка и степени фокусировки  $d$  пучка на поверхности детали. На рис. 7.14 поясняется процесс определения величин  $\epsilon$  и  $d$ . На оси абсцисс отложены номера ячеек накопите-

лей  $N$  и соответствующая им координата  $x$  положения оси пучка относительно оси пушки. Величина смещения стыка относительно центра развертки  $\varepsilon$  определяется как разность между номером ячейки накопителя  $N_{\max}$ , в которой сигнал максимален, и номером ячейки середины развертки

$$\varepsilon = N_{\max} - 64.$$

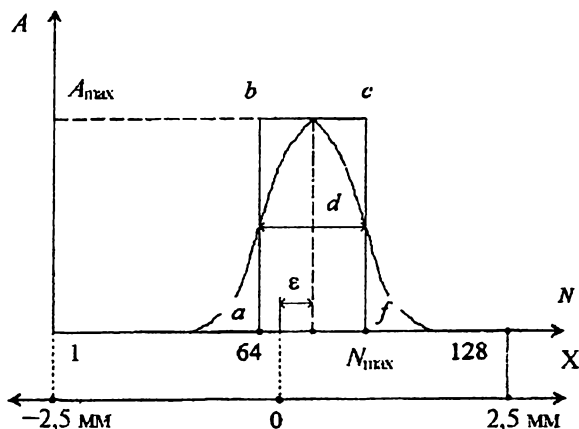


Рис. 7.14. Схема определения смещения пучка  $\varepsilon$  и степени фокусировки  $d$  пучка на поверхности деталей

Точность определения  $\varepsilon$  зависит от числа накопителей  $N$  и величины амплитуды сканирования пучка по оси  $X$ . При амплитуде сканирования 5 мм и  $N = 128$  дискретность по  $\varepsilon$

$$\Delta\varepsilon = \frac{5}{128} = 0,04 \text{ мм.}$$

Степень фокусировки  $d$  определяется как отношение площади импульса стыка к максимальному значению амплитуды сигнала от стыка  $A_{\max}$ :

$$d = \frac{S_{\text{ис}}}{A_{\max}}.$$

Фокусировка достигается тогда, когда параметр  $d$  становится минимальным. Рассчитанные параметры выводятся на индикацию, контроллер импульс СИ<sub>3</sub>, блокирующий схему аварийного вывода пучка, и процесс слежения возобновляется.

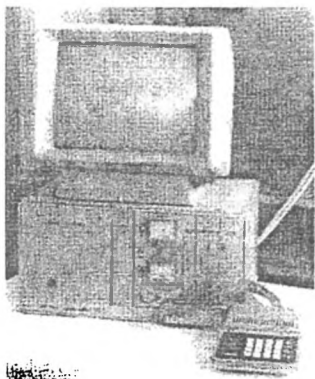


Рис. 7.15. Микропроцессорная система слежения по стыку и фокусировки пучка

Конструктивно система выполнена в виде отдельного системного блока, в состав которого входят плата контроллера, плата ЦАПов блока выброса пучка, измерительного блока, плата индикации, плата АРУ и модели, источники питания. На переднюю панель системного блока выведены элементы индикации положения стыка, фокуса и режима работы системы. На рис. 7.15 показан внешний вид системы. В качестве элементов в системе использованы интегральные микросхемы К1108ПА1 (ЦАП), К1107ПВ2 (АЦП), КР580ИК55 (программируемый параллельный интерфейс), К541РУ2 (статическое ОЗУ).

В системе использован рентгеновский датчик с коллимационной насадкой, показанный на рис. 5.13. Чувствительным элементом датчика является сцинтилляционный кристалл на основе NaJ. Преобразование световых импульсов в электрический сигнал производится с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-85. Для согласования выходного сигнала с сопротивлением кабеля в корпус датчика вмонтирован предварительный усилитель.

Испытания системы проводились в лабораторных условиях на электронно-лучевой установке ЭЛУ-5 с источником питания ЭЛА 60/15. Рентгеновский датчик с щелевым коллиматором закреплялся на сварочной пушке так, что проекция коллимационного отверстия датчика на поверхности свариваемых деталей пересекала стык на расстоянии 20 мм от места сварки под углом  $6^\circ$  к оси стыка. Совмещение траектории сканирования с проекцией коллимационного датчика производилось путем регулирования коэффициентов усилителей мощности отклоняющих систем  $УМ_x$ ,  $УМ_y$ . Контроль совмещения производился по выходному сигналу рентгеновского датчика при сканировании однородной поверхности.

Испытания системы проводились при токах электронного пучка от 1 до 150 мА, ускоряющем напряжении 60 кВ. Сваривались кольцевые образцы из сплава АМгб и стали 20Х13 диаметром 400 мм и толщиной 30 мм. Образцы-имитаторы имели зазор в стыке 0,1 мм и устанавливались на манипуляторе установки с биением стыка  $\pm 2$  мм. Точность совмещения электронного пучка со стыком определялась по результатам рентген-контроля сварных швов и микрошлифам. Для

оценки эффективности стабилизации фокусного расстояния сваривались плоские образцы из сплава АМгб с перепадом высоты 50 мм.

Испытания выявили работоспособность микропроцессорной системы слежения с коллимрированным рентгеновским датчиком во всем диапазоне рабочих токов от 1 до 150 мА при гарантированном зазоре в стыке не менее 0,1 мм. Погрешность позиционирования электронного пучка по стыку не превышала 0,2 мм. На рис. 7.16 и 7.17 представлены фотографии микрошлифов, характеризующие положение сварного шва относительно стыка при отсутствии слежения и при наличии слежения по стыку.

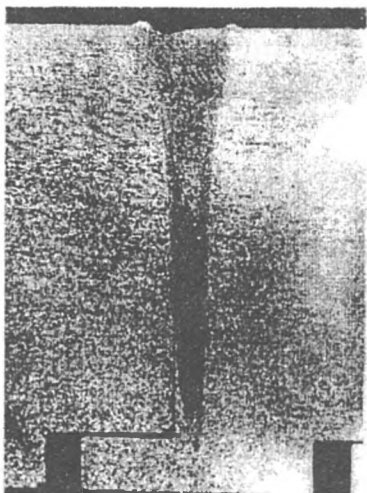


Рис. 7.16. Микрошлиф сварного соединения, выполненного при отсутствии слежения

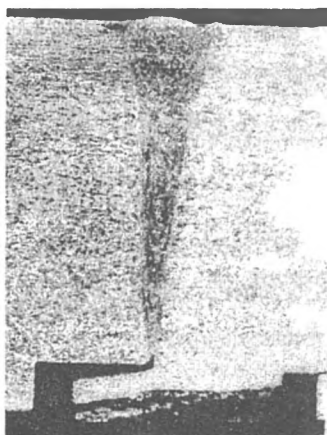


Рис. 7.17. Микрошлиф сварного соединения, выполненного с автоматическим слежением за стыком

Производственные испытания микропроцессорной системы слежения с рентгеновским датчиком выявили ее пригодность для слежения за стыком в производственных условиях. Недостатком системы является необходимость гарантированного зазора в стыке не менее 0,1 мм или аналогичной по величине разделки кромок. Если же это условие не выполнено, то возможны сбои в работе системы и надежность ее функционирования снижается. При сварке ответственных узлов, когда стоимость их высока, требования к надежности функционирования системы слежения по стыку достаточно жесткие. В этих случаях подготовка изделия под сварку проводится более тщательно, а система слежения должна быть комбинированной, сочетающей предва-

рительное программирование стыка как в режиме слежения на малом токе электронного пучка, так и в режиме слежения на рабочем токе с анализом характеристики сигнала от стыка. В случае если надежность функционирования на рабочем токе снижается, система автоматически переходит на режим воспроизведения записанной программы. Надежность такой системы за счет гибкости ее функционирования резко возрастает. Оператор имеет возможность выбирать принцип функционирования системы слежения в зависимости от особенностей свариваемых изделий и качества подготовки стыков под сварку.

### 7.3. Микропроцессорная АСУ ТП ЭЛС

В состав комплекса ЭЛС входит электронно-лучевая установка, содержащая вакуумную камеру с системой вакуумирования, сварочные манипуляторы с управляемыми электроприводами, а также электронно-лучевое оборудование, содержащее энергокомплекс, электронно-лучевую пушку и различные системы управления технологическим процессом ЭЛС, устройства контроля и наблюдения за процессом.

Все эти устройства и системы должны управляться одним оператором. Поэтому управление таким комплексом необходимо осуществлять с единого пульта, а все подсистемы комплекса должны работать в автоматическом режиме. Функции оператора сводятся к переключению режимов работы подсистем, наблюдению за процессом и принятию решений в нестандартных ситуациях. Перечисленным требованиям отвечает микропроцессорная автоматизированная система управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки (АСУ ТП ЭЛС).

В Сибирской аэрокосмической академии разработана микропроцессорная АСУ ТП ЭЛС, отвечающая перечисленным требованиям [119]. Функциональная схема микропроцессорной АСУ изображена на рис. 7.18. Она содержит одноплатную ЭВМ с пультом управления ПУ и видеомонитором ВМ. МикроЭВМ сконструирована на базе микропроцессора Т34ВМ1 и имеет объем памяти 64 Кбайт. 8 Кбайт занято под ППЗУ, используемое для записи программы, а остальной объем занимает ОЗУ. Связь микроЭВМ с внешними устройствами осуществляется через устройство оптической развязки ОР, которое формирует две шины интерфейса: восьмиразрядную шину данных ШД и шину управления объектами ШУО, представляющую собой радиальную структуру индивидуальных шин адресации и управления.

К шинам интерфейса предусмотрено подключение автономных подсистем контроля и управления глубиной проплавления, контроля и



стабилизации диаметра электронного пучка, стабилизации скорости сварки и блока функционального сканирования, осуществляющего развертку технологического электронного пучка по программируемым траекториям. Указанные функциональные блоки могут иметь различную структуру и выполняются в виде отдельных микропроцессорных подсистем. Ввод исходных данных в подсистемы осуществляется с пульта управления микропроцессорной АСУ. Отображение информации о регулируемых параметрах и режимах работы подсистем осуществляется на видеомониторе ВМ.

Одной из функций микропроцессорной АСУ является регистрация параметров процесса ЭЛС: ускоряющего напряжения, тока пучка, скорости сварки, амплитуд сканирования по осям  $X$  и  $Y$  и фокуса, частоты сканирования. Для контроля указанных параметров и формирования управляющих воздействий и установок используется блок УСО, в состав которого входит многоканальный АЦП и цифро-аналоговые преобразователи.

В микропроцессорной АСУ слежение по стыку основано на принципе предварительной записи программы по методу синхронного детектирования, рассмотренному ранее. Для этой цели используется избирательный усилитель первой гармоники ИУ<sub>1</sub>, демодулятор ДМ<sub>1</sub>, преобразователь напряжение частота ПНЧ, реверсивный счетчик РСЧ и цифро-аналоговый преобразователь ЦАП, усилитель мощности, стоящий в цепи формирования тока отклоняющей системы. Цифровой код, снимаемый с регистра Р по шине данных ШД, используется для записи программы траектории стыка. В режиме воспроизведения программы последовательность цифровых сигналов извлекается из памяти микро-ЭВМ, через шину данных поступает на ЦАП и осуществляет повторение записанной программы тока отклоняющей системы.

Сигнал второй гармоники, формируемый избирательным усилителем ИУ<sub>2</sub> и демодулятором ДМ<sub>2</sub>, используется для фокусировки электронного пучка, анализа чувствительности измерительного устройства и отключения слежения на прихватках.

Для синхронизации записанной программы траектории стыка с перемещением свариваемого изделия используется оптический датчик перемещения ДП типа ВЕ-178, у которого на один оборот вала формируется 1024 импульса. Формирующий преобразователь ФП вырабатывает последовательность нормированных импульсов и сигнал о направлении перемещения. Запись траектории стыка и воспроизведение программы в процессе сварки могут осуществляться при любом направлении перемещения изделия.

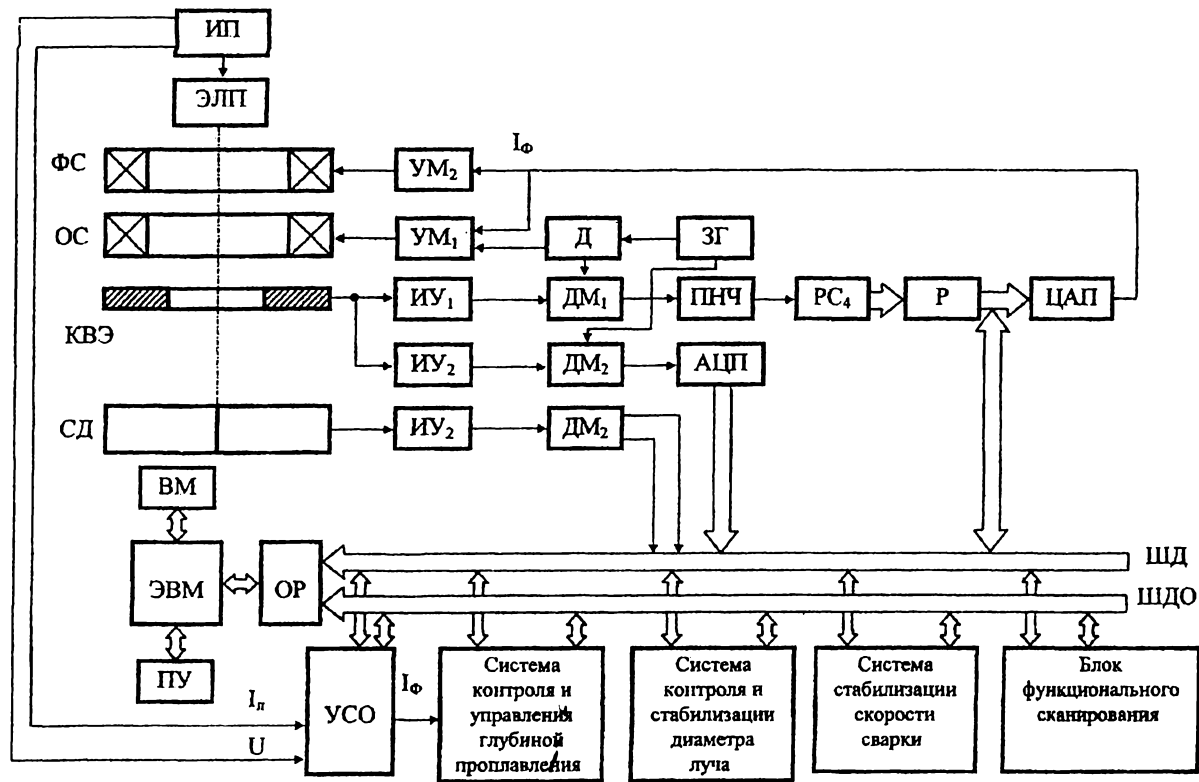


Рис. 7.18. Функциональная схема микропроцессорной АСУ

Микропроцессорная АСУ ЭЛС выполняет следующие основные режимы работы:

- режим поиска стыка;
- режим записи траектории стыка;
- режим выполнения прихваток;
- режим сварки;
- режим косметического прохода шва.

Перевод системы в указанные режимы осуществляется оператором.

В режиме поиска стыка устанавливается ток пучка 2...5 мА. Электронный пучок программно сканируется поперек стыка в пределах отклонения  $\pm 5$  мм. В процессе сканирования анализируется сигнал датчика стыка и уровень второй гармоники. Положение стыка фиксируется в тот момент, когда показание датчика стыка равно нулю, а уровень второй гармоники максимален. При сканировании в обратном направлении при достижении фиксированного уровня контур обратной связи следящей системы замыкается и производится захват стыка. Оператор с помощью средств визуального наблюдения контролирует захват стыка и переводит систему на следующий режим работы.

В режиме записи траектории стыка включается перемещение изделия. Осуществляется автоматическое слежение электронного пучка по стыку свариваемого изделия за счет изменения тока в отклоняющей системе, воспроизводящей положение стыка. Цифровой эквивалент перемещения пучка записывается в ячейки ОЗУ в моменты прихода импульсов с датчика перемещения изделия. Всего записывается 1024 точки программы траектории стыка. В процессе слежения осуществляется анализ чувствительности измерительного устройства по уровню второй гармоники и прекращение слежения при чувствительности ниже порогового уровня. На экране монитора отображается траектория движения пучка, а также координаты свариваемого изделия, где чувствительность была нормальной. По окончании режима записи выдается показатель наличия чувствительности по длине стыка, рассчитанный по формуле

$$C = \left( \frac{N_i}{1024} \right) 100 \%,$$

где  $N_i$  – количество координат с нормальной чувствительностью. Оператор оценивает величину  $C$ , а также равномерность распределения координат с нормальной чувствительностью по длине стыка и принимает решение о переходе к следующему режиму или повторению предыдущего. При переходе к следующему режиму программно осуществ-

вляется линейная интерполяция участков, на которых была низкая чувствительность. Обработанная информация записывается в ЭВМ по соответствующим адресам.

Режим выполнения прихваток осуществляется при необходимости. В этом случае при внесении в компьютер исходных данных о режимах сварки устанавливается количество прихваток, их длина и ток электронного пучка при выполнении прихватки. Прихватки равномерно распределяются по длине стыка. В режиме прихваток в процессе воспроизведения траектории стыка осуществляется ввод и вывод рабочего тока пучка в соответствии с длиной и количеством прихваток.

В режиме сварки осуществляется программный ввод и вывод пучка в соответствии с заданным временем ввода и вывода, а также стабилизация энергетических параметров электронного пучка, осуществляемая через подсистемы комплекса. При наличии аварийного режима микропроцессорной АСУ или ее подсистем предусмотрено автоматическое прекращение сварки.

Ввод данных в микропроцессорную АСУ ЭЛС производится в диалоговом режиме перед началом работы системы. При этом вводятся данные о наименовании изделия, фамилия оператора, все необходимые технические параметры работы системы в различных режимах, тип сварного шва (кольцевой или линейный), его длина и длина прихваток, а также допуски на технологические параметры процесса сварки. В процессе ЭЛС система контролирует технологические параметры процесса и регистрирует отклонения параметров, превышающие допустимые значения, а также координату стыка, где имели место указанные отклонения. Микропроцессорная АСУ предусматривает подключение печатающего устройства для регистрации параметров технологического процесса и возникающих отклонений параметров с их привязкой к

координатам свариваемого изделия. Эта распечатка прилагается к технологическому паспорту изделия и используется службой ОТК для контроля качества сварных соединений.

Разработана техническая документация на микропроцессорную АСУ ЭЛС. Внешний вид системы изображен на рис. 7.19. Изготовлены и испытаны опытные образцы, которые внедрены в производство на предприятиях КБ «Салют» и НПО «Техномаш» (г. Москва).



Рис. 7.19. Микропроцессорная АСУ ЭЛС

#### **7.4. Применение средств контроля и управления для экспериментальных исследований и оптимизации процесса ЭЛС**

Разработка технологии ЭЛС – длительный и дорогостоящий процесс. Поскольку математическое моделирование дает лишь приближенные значения параметров технологического процесса, то эта задача решается экспериментальными методами. Производится электронно-лучевая сварка некоторого количества образцов с различными параметрами технологического процесса. Затем делаются микрошлифы сварного соединения, оценивается его качество, глубина проплавления и выбираются те параметры технологического процесса, которые дают приемлемое качество соединения при заданной глубине проплавления. Контроль правильности выбранных режимов производится путем сварки опытных образцов изделий. Такой традиционный путь отработки технологического процесса сопряжен со значительными временными и материальными затратами, связанными с подготовкой к работе электронно-лучевого оборудования, вакуумирования камеры при сварке каждого образца. Уменьшение количества обрабатываемых образцов приводит к ограничению возможностей выбора оптимальных параметров процесса. Правильность выбора параметров и количество сварных соединений в значительной степени зависят от квалификации и опыта работы технолога-оператора. Это обстоятельство ограничивает область применения ЭЛС, которая все еще прибывает в разряде уникальных технологий.

Указанные противоречия могут быть устранены путем создания автоматизированного комплекса для экспериментальных исследований и оптимизации технологического процесса ЭЛС, который многократно повышает производительность исследовательских работ. Математические методы планирования эксперимента позволяют достаточно быстро рассчитать оптимальные параметры технологического процесса, исходя из выбранного критерия оптимизации. Управление экспериментом и необходимые расчеты производятся с использованием вычислительной техники, входящей в состав автоматизированного комплекса [55; 131; 156; 161].

Рассмотренный подход к автоматизации электронно-лучевой сварки, предусматривающий контроль и стабилизацию энергетических параметров электронного пучка и глубины проплавления, позволяет более точно воспроизводить параметры сварного соединения [118]. Новый подход требует новых решений технологического процесса ЭЛС. С помощью автоматизированного комплекса целесообразно соз-

давать банк оптимальных решений при сварке различных материалов, сварных соединений при различной глубине проплавления. Для реализации такого подхода в состав автоматизированного комплекса должны входить все необходимые средства для контроля и управления ЭЛС.

Основными параметрами технологического процесса ЭЛС являются:

- ускоряющее напряжение;
- ток электронного пучка;
- плотность распределения энергии по сечению пучка и его эффективный диаметр;
- форма, частота и амплитуда сканирования технологического электронного пучка;
- скорость сварки;
- свариваемый материал.

В результате сварки формируется сварной шов, который описывается следующими основными параметрами:

- глубиной проплавления и ее нестабильностью;
- шириной сварного шва в его верхней и нижней части, непараллельностью стенок;
- радиусом скругления в корне шва;
- занижением сварного шва, нестабильностью его формирования в верхней части;
- дефектами сварного шва (поры, несплошности, непровары, корневые дефекты).

Из численных характеристик сварного шва должен быть определен критерий оптимизации, используемый при выборе оптимальных технологических параметров. В качестве критерия оптимизации невозможно выбрать какой-либо один параметр процесса, поэтому приходится рассматривать комплексный критерий оптимизации, в котором параметры шва входят в формулу со своими весовыми коэффициентами. Выбор критерия оптимизации является наиболее ответственным этапом, так как от вида критерия оптимизации зависят оптимальные параметры технологического процесса. Для определения критерия оптимизации должна быть установлена количественная или качественная связь между параметрами соединения и его качеством. Качество сварного соединения оценивается, исходя из условий его работы в составе изделия. Качество сварного соединения может быть определено на основании требований прочности, герметичности и коррозионной стойкости. Кроме того, необходимо учитывать возникающие при сварке деформации и напряжения. При выборе критерия оптимизации целесообразно руководствоваться отраслевыми нормативными документа-

ми для контроля качества сварного соединения. Так, например, должны быть полностью исключены такие дефекты, как непровар, корневые дефекты, несплошности. На поры накладываются ограничения как по их размеру, так и по количеству на единицу длины шва. Следовательно, такие дефекты, как непровар, несплошности и корневые дефекты, не входят в критерий оптимизации, а область рассматриваемых технологических параметров должна исключать возможность их появления. Количество пор на единицу длины входит в критерий оптимизации.

Рассмотрим другие параметры сварного шва, которые целесообразно включить в критерий оптимизации. Одним из таких параметров является нестабильность глубины проплавления, которая может быть определена в виде

$$y_1 = \frac{\Delta H}{H_0},$$

где  $\Delta H$  – амплитуда пульсаций глубины проплавления и поверхности шва;  $H_0$  – глубина проплавления. Нестабильность глубины проплавления и поверхности шва, характерная для ЭЛС, обусловлена периодическими процессами формирования канала проплавления и усадкой металла при его затвердевании, которая также имеет периодический характер. Важным параметром, характеризующим качество шва, является непараллельность стенок сварного шва, определяемая в виде

$$y_2 = \frac{b_{0,2} - b_{0,8}}{0,6H_0},$$

где  $b_{0,2}$  – ширина шва на глубине  $0,2H_0$ ;  $b_{0,8}$  – ширина шва на глубине  $0,8 H_0$ .

Непараллельность стенок шва характеризует изгибные деформации и напряжения, которые возникают в изделии после сварки. Идеальный сварной шов должен иметь параллельные стенки. В этом случае изгибные деформации минимальны.

Еще одним параметром, характеризующим качество шва, является величина радиуса скругления в корне шва. От радиуса скругления зависит вероятность появления корневого дефекта и непровара. При радиусе скругления меньше некоторого критического значения вероятность корневых дефектов и непроваров, вызванных отклонением пучка от плоскости стыка, становится существенной. Определим функцию, характеризующую потери качества как величину обратную радиусу скругления:

$$y_3 = \frac{1}{r_{\text{ск}}}.$$

Потери качества от пор определим в виде

$$y_4 = \frac{n}{l},$$

где  $n$  – количество пор;  $l$  – длина сварного шва.

Эффективность электронно-лучевой сварки характеризуется погонной мощностью электронного пучка, определяемой выражением

$$y_5 = \frac{UI}{V_{\text{св}}}.$$

Чем меньше погонная энергия, тем эффективнее процесс электронно-лучевой сварки, меньше зона термического влияния и сварочные деформации. Следует заметить, что потери, описываемые  $y_3$  и  $y_5$ , находятся в противоречии. Получение большого радиуса скругления в корне шва требует увеличения ширины шва. В то же время уменьшение погонной энергии приводит к уменьшению ширины шва. Это обстоятельство объясняет присутствие минимума функционала потерь в реальной области параметров процесса.

Определим функционал потерь в виде

$$y = y(y_1, y_2, \dots, y_5).$$

В простейшем случае этот функционал может иметь вид

$$y = a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 + a_4 y_4 + a_5 y_5, \quad (7.1)$$

где коэффициенты  $a_i$  – весовые коэффициенты, учитывающие влияние соответствующих составляющих функционала потерь.

Аналитическое определение весовых коэффициентов затруднено, поэтому целесообразно использовать метод экспертных оценок. Очевидно, что для нахождения оптимальных параметров технологического процесса необходимо минимизировать функционал (7.1). Обычно оптимальные решения определяют для конкретного электронно-лучевого оборудования при сварке конкретного материала с определенной глубиной проплавления. В этом случае ускоряющее напряжение стабилизируется на определенном (для данного оборудования) значении и в число варьируемых параметров процесса не входит.

Поскольку при любых значениях параметров процесса проплавление должно производиться на определенную глубину, то важнейшей



составляющей автоматизированного комплекса должна являться система стабилизации глубины проплавления. Она осуществляется за счет изменения тока электронного пучка. Поэтому ток электронного пучка также не входит в число варьируемых параметров, хотя он контролируется и регистрируется для каждого набора параметров.

В связи с изложенным варьируемыми параметрами процесса являются:

- скорость сварки;
- диаметр электронного пучка (ток фокусировки);
- амплитуда сканирования по  $X$ ;
- амплитуда сканирования по  $Y$ ;
- амплитуда сканирования по фокусу;
- частота сканирования.

Обычно оптимизацию проводят для нескольких форм траекторий сканирования электронного пучка. Технологическое сканирование позволяет изменить закон распределения энергии электронного пучка, а вследствие этого изменить форму канала проплавления и сварного шва. Поэтому, выбирая соответствующую форму сканирования и его параметры, можно получить близкую к желаемой форму проплавления сварного шва. Существенное влияние на форму оказывают диаметр электронного пучка и скорость сварки. Подбор соответствующих параметров и тока электронного пучка при достижении заданной глубины проплавления является целью оптимизации. Использование автоматизированного комплекса позволяет многократно повысить производительность исследовательских работ.

На рис. 7.20 изображена структурная схема автоматизированного комплекса [89]. Автоматизированный комплекс разработан на базе персональной ЭВМ и предназначен для программного управления электронно-лучевой сваркой, а также для сбора текущей информации и ее обработки по введенным в программу алгоритмам.

Связь ЭВМ с внешними устройствами осуществляется через устройство связи с объектом (УСО). УСО состоит из устройства гальванической развязки и набора буферных регистров и преобразователей, которые выполняют прием и передачу цифровой и аналоговой информации для устройств, входящих в состав комплекса. Для перемещения свариваемого изделия и регулирования скорости сварки используется двухкоординатный манипулятор с управляющими электроприводами постоянного тока. Манипулятор позволяет за одну откачку производить сварку до 64 образцов. Управление приводами может производиться с пульта управления и программно от ЭВМ.

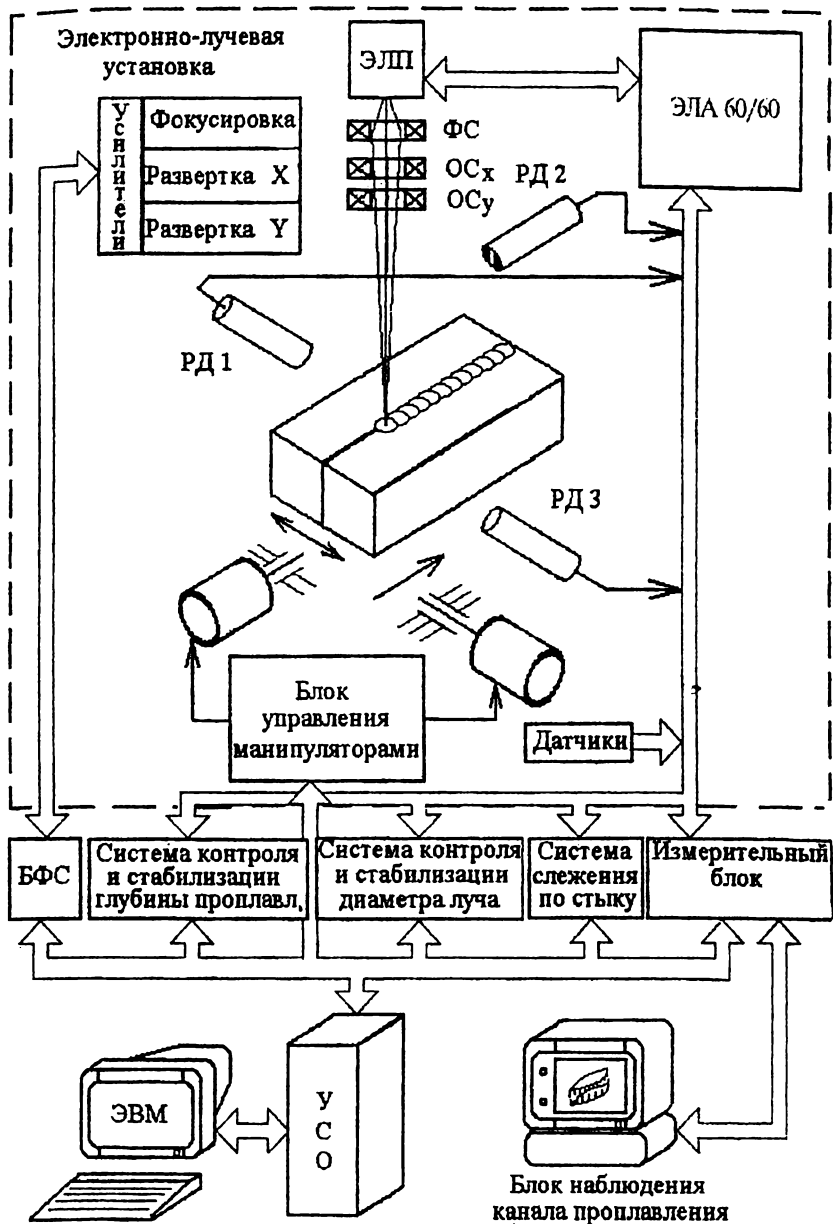


Рис. 7.20. Структурная схема автоматизированного комплекса для исследований и оптимизации технологии ЭЛС

Фокусировка электронного пучка производится по двум каналам: грубой и точной фокусировки пучка. Каждый канал состоит из фокусирующей линзы и усилителя постоянного тока. Отличие канала грубой фокусировки состоит в том, что число витков его фокусирующей линзы на порядок больше, чем у канала точной фокусировки. Усилители постоянного тока позволяют с высокой точностью устанавливать токи грубой и точной фокусировки как с пульта управления, так и программно от ЭВМ или системы контроля и стабилизации диаметра пучка.

Сканирование электронного пучка осуществляется от блока функционального сканирования (БФС), который представляет собой программное устройство с цифро-аналоговыми преобразователями по трем каналам – по числу координат сканирования [28]. Траектории сканирования записываются в перепрограммируемое запоминающее устройство. Объем памяти позволяет запрограммировать восемь траекторий сканирования. Сканирование заключается в одновременном синхронном перемещении электронного пучка по трем координатам: вдоль направления сварки, поперек направления сварки и по изменению диаметра пучка (фокусу). Эти перемещения осуществляются с помощью двух отклоняющих систем и канала точной фокусировки. Управление амплитудами сканирования по трем координатам и частоте сканирования может производиться как в ручном режиме, так и программно от ЭВМ.

Регулирование тока сварки может осуществляться как вручную от источника питания ЭЛА 60/60, так и программно от ЭВМ. Точность установки тока пучка обеспечивается наличием обратной связи с ЭВМ по этому каналу. Для решения задач оптимизации возникает необходимость в стабилизации глубины проплавления. С этой целью в комплекс введена система контроля и стабилизации глубины проплавления, позволяющая, автоматически регулируя ток сварки, поддерживать постоянной глубину проплавления.

В состав комплекса также входит система контроля и стабилизации диаметра электронного пучка, позволяющая контролировать и стабилизировать энергетические характеристики технологического электронного пучка. В зависимости от задачи исследований, система может работать как в режиме контроля диаметра пучка, так и в режиме контроля и стабилизации. В последнем варианте управление диаметром пучка осуществляется через канал точной фокусировки. Исходные данные и уставки на систему поступают с персональной ЭВМ.

Наблюдение за процессом формирования сварного шва – одна из целей создания автоматизированного комплекса. Для этого был создан

блок наблюдения канала проплавления [23; 95]. Работа этого блока основана на использовании принципа контроля глубины проплавления по рентгеновскому излучению сварочной ванны.

Функциональная схема блока наблюдения канала проплавления изображена на рис. 7.21. Сущность использованного метода заключается в том, что для каждой точки траектории сканирования определяется заглупление электронного пучка в свариваемый материал и строится трехмерное изображение. Для определения величины заглупления электронного пучка в свариваемый материал используется рентгеновский датчик, размещенный с обратной стороны свариваемых образцов, и нелинейный усилитель, преобразующий сигнал рентгеновского датчика в напряжение, пропорциональное глубине проплавления.

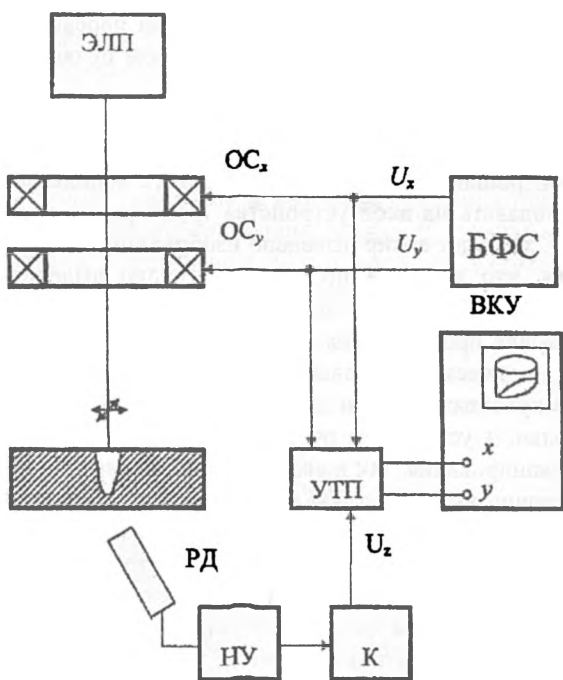


Рис. 7.21. Функциональная схема блока наблюдения канала проплавления: ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ОС<sub>x</sub>, ОС<sub>y</sub> – отклоняющие системы по осям  $x$  и  $y$ ; РД – рентгеновский датчик; НУ – нелинейный усилитель; К – коммутатор; УТП – устройство трехмерного преобразования; ВКУ – видеоконтрольное устройство; БФС – блок функционального сканирования

В устройстве трехмерного преобразования осуществляется преобразование входных сигналов в соответствии со следующими выражениями:

$$x = K_1 U_x - K_2 U_y,$$

$$y = K_3 U_x + K_4 U_y + K_5 U_z,$$

где  $K_1, \dots, K_5$  – масштабные коэффициенты изображения. С помощью изменения масштабных коэффициентов можно трансформировать аксонометрическое изображение по соответствующим координатам. При этом может быть изменен как масштаб изображения, так и направление осей координат изображения. При построении аксонометрического изображения используются три координаты для канала проплавления. Две из них соответствуют положению пучка на плоскости сканирования, а третьей координатой является заглупление пучка в свариваемое изделие.

Изображение на экране видеоконтрольного устройства строится в виде трехмерного изображения объемного тела на плоскости. В качестве видеоконтрольного устройства может быть использован осциллограф. Если подавать на вход устройства трехмерного преобразования координату  $z$ , то будет воспроизведено изображение только дна канала проплавления, что не наглядно, так как трудно выделить величину заглупления пучка. Поэтому целесообразно получить изображение основания канала проплавления. Для этого используется коммутатор, который периодически прерывает подачу сигнала  $U_z$  на устройство трехмерного преобразования и делает его равным нулю. При этом на видеоконтрольном устройстве очерчивается как основание канала по траектории сканирования, так и его дно. Частота переключения коммутатора достаточно высока, чтобы в каждой точке изображения сигнал  $U_z$  принимал значение  $U_z$  и нулевое значение. Если процесс сварки ведется без сканирования электронного пучка, то на экране видеоконтрольного устройства будет изображение двух светящихся точек, одна из которых – неподвижная – соответствует основанию канала проплавления, а другая дну канала проплавления.

На рис. 7.22 показано изображение канала проплавления. По полученному изображению можно наблюдать гидродинамические процессы в сварочной ванне, которые характеризуют условия формирования сварного шва. Блок наблюдения канала проплавления расширяет информационные возможности автоматизированного комплекса.

Для проведения исследовательских работ и регистрации параметров технологического процесса в состав автоматизированного



Рис. 7.22. Изображение канала проплавления

комплекса введен измерительный блок, включающий буферные усилители, аналого-цифровые преобразователи и регистры. Измерительный блок служит для преобразования и ввода в ЭВМ информации различных датчиков (вторично-эмиссионных, рентгеновских, оптических, датчиков перемещения и др.). Через измерительный блок осуществляется контроль и регистрация параметров технологического процесса (уско-

ряющего напряжения, тока пучка, тока фокусировки, скорости сварки, координат перемещения манипулятора). Контроль, запоминание и регистрация показаний датчиков осуществляется в соответствии с алгоритмом и программой проведения эксперимента.

На рис. 7.23 представлен внешний вид автоматизированного комплекса. Автоматизированный комплекс внедрен в производство на Красноярском машиностроительном заводе. С помощью этого комплекса проведены исследования по оптимизации технологии ЭЛС для различных траекторий сканирования электронного пучка (эллипс, треугольник, крест, окружность) [98; 100].

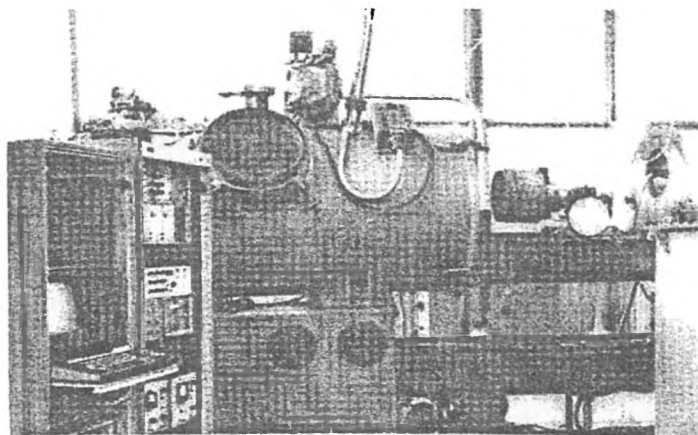


Рис. 7.23. Автоматизированный комплекс для исследований и оптимизации технологии ЭЛС

Анализ показал, что наиболее благоприятное воздействие на формирование сварного шва оказывают траектории сканирования, векторы скорости которых симметричны относительно направления сварки (крест, разорванный эллипс). При сварке с применением таких траекторий радиус корня шва увеличивается, что снижает вероятность появления корневого дефекта. Улучшается также параллельность стенок шва. Проведенные эксперименты показали, что благоприятный эффект достигается с применением траектории сканирования, близкой к изотермам сварочной ванны. Получены следующие оптимальные параметры процесса при сварке образцов из сплава АМгб: скорость сварки – 60 м/ч; амплитуда сканирования вдоль стыка – 5 мм; амплитуда сканирования поперек стыка – 2 мм; частота сканирования – 700 Гц; расфокусировка – 0,25 мА; амплитуда сканирования по фокусу – 0,25 мА. На рис. 7.24 показана фотография микрошлифа сварного соединения, полученного при указанных параметрах технологического процесса.

Исследования показали, что производительность исследовательских работ с использованием автоматизированного комплекса увеличилась в 7...10 раз.

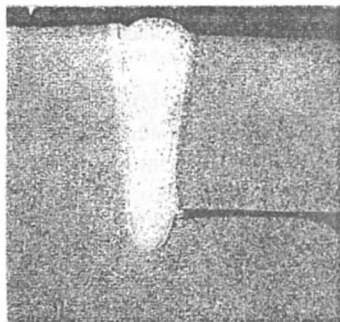


Рис. 7.24. Микрошлиф сварного соединения, полученного на оптимальных режимах сварки

## Выводы

1. С использованием изложенных принципов контроля и управления ЭЛС по вторично-электронной эмиссии и рентгеновскому излучению разработаны функциональные и принципиальные схемы и созданы промышленные образцы:

- систем слежения по стыку и фокусировки электронного пучка с предварительной записью программы, адаптивных к магнитным полям и прихваткам;
- микропроцессорной системы слежения по стыку на рабочем токе с коллимированным рентгеновским датчиком;
- микропроцессорной АСУ ТП ЭЛС, объединяющей подсистемы слежения по стыку, контроля и стабилизации диаметра пучка, контроля и стабилизации глубины проплавления;
- автоматизированного комплекса для исследований и оптимизации технологии ЭЛС.

2. Лабораторные и производственные испытания систем, опыт их промышленной эксплуатации подтвердили эффективность принятых теоретических и практических решений. Погрешность позиционирования пучка по стыку не превышает  $0,1 \dots 0,2$  мм.

3. Опыт промышленной эксплуатации показал, что система слежения по стыку с предварительной записью траектории обладает высокой надежностью – за счет автоматического распознавания прихваток с помощью канала анализа чувствительности и последующей перезаписи траектории по методу линейной интерполяции.

4. Для надежного функционирования систем слежения на рабочем токе требуется гарантированный зазор в стыке или разделка кромок в пределах  $0,1 \dots 0,2$  мм.

5. Влияние магнитных полей на погрешность позиционирования по стыку может быть уменьшено за счет их контроля и введения компенсирующего воздействия через двойную отклоняющую систему.

6. Оптимизацию технологии ЭЛС целесообразно проводить на автоматизированном комплексе по методике планирования эксперимента со стабилизацией глубины проплавления, используя комплексный критерий качества. Производительность исследовательских работ при этом повышается в  $7 \dots 10$  раз.

7. Путем контроля рентгеновского излучения при сварке сканирующим электронным пучком реализовано наблюдение канала проплавления, позволяющее анализировать гидродинамические процессы в сварочной ванне.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1004047 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для слежения за линией стыка при ЭЛС / Ю. Н. Пастушенко, А. Б. Коваль, Ю. Г. Куцан.
2. А. с. 1052355 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ слежения за линией стыка при ЭЛС / Ю. Н. Пастушенко, О. К. Назаренко, В. Е. Локшин, В. И. Шоповал.
3. А. с. 1053401 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ фокусировки луча и слежения за стыком при электронно-лучевой сварке / В. Д. Лаптенок и др.
4. А. с. 1061345 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для измерения диаметра электронного луча при ЭЛС / М. Н. Баранов, В. Н. Иосилович, А. А. Каплан, В. М. Кордун.
5. А. с. 1091439 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ измерения диаметра сварочного луча / А. А. Каплан, М. Н. Баранов, В. М. Кордун.
6. А. с. 1091440 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ измерения диаметра сварочного электронного луча / А. А. Каплан и др.
7. А. с. 1103431 СССР, МКИ В 23К 15/00. Установка для ЭЛС с устройством для видеоконтроля / Ю. Г. Пахомов.
8. А. с. 1107409 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для совмещения луча со стыком при сварке / В. Д. Лаптенок, В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев.
9. А. с. 1123183 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для электронно-лучевой сварки / В. Д. Лаптенок, В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев.
10. А. с. 1197271 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ наведения электронного луча на стык при электронно-лучевой сварке и устройство для его осуществления / Н. Н. Ефимов, М. Л. Лившиц, Н. Г. Лобанов и др.
11. А. с. 1197272 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для слежения за стыком при электронно-лучевой сварке / В. Д. Лаптенок, В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев.
12. А. с. 1197277 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ наведения электронного луча на стык при ЭЛС и устройство для его осуществления / Н. Н. Ефимов, М. Л. Лившиц, Н. Г. Лобанов, В. А. Виноградов.
13. А. с. 1205416 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ определения параметров луча при электронно-лучевой сварке / Н. А. Ольшанский, А. В. Михайлов.
14. А. с. 1255342 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / В. Д. Лаптенок, В. Я. Браверман, С. Г. Баякин, Б. М. Крячко, В. Г. Угрюмов.

15. А. с. 1260142 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и устройство для его осуществления / В. Д. Лаптенко, С. Г. Баякин, В. Я. Браверман, М. А. Федоров.
16. А. с. 1272593 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля степени фокусировки при ЭЛС / К. С. Акопянц и др.
17. А. с. 1326414 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля отклонения стыка при электронно-лучевой сварке / А. Г. Кроз, А. П. Фатеева, В. А. Кривенков и др.
18. А. с. 1342648 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ управления электронно-лучевой сваркой / Б. Е. Патон, Ю. Н. Лакшин, О. К. Назаренко.
19. А. с. 1349122 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля степени фокусировки электронного луча / К. С. Акопянц и др.
20. А. с. 1383633 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для контроля симметричности распределения тока в электронном луче / В. П. Разин, Н. С. Левик, В. В. Соколов, В. С. Павменов.
21. А. с. 1391834 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ слежения за стыком при электронно-лучевой сварке / А. А. Солнцев, А. П. Бесчетнов.
22. А. с. 1405977 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и устройство для его осуществления / В. Д. Лаптенко, В. Я. Браверман, В. Б. Помогалов, С. Г. Баякин, А. Д. Дрянных, А. В. Мурыгин.
23. А. с. 1433690 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля канала проплавления при ЭЛС / В. Д. Лаптенко, В. В. Башенко, С. Г. Баякин и др.
24. А. с. 1449283 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ слежения по стыку при ЭЛС / А. А. Солнцев.
25. А. с. 1455506 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / В. Д. Лаптенко, В. В. Башенко, С. Г. Баякин и др.
26. А. с. 145943 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ управления электронно-лучевой сваркой и устройство для его осуществления / К. А. Сукач, Ю. Г. Куцан, С. Н. Ковбасенко.
27. А. с. 1493422 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для слежения за стыком при электронно-лучевой сварке / В. Д. Лаптенко, В. Я. Браверман, А. Н. Генцелов.
28. А. с. 1493423 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / В. Д. Лаптенко, С. Г. Баякин, В. Г. Угрюмов и др.
29. А. с. 1504040 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ стабилизации глубины проплавления при ЭЛС / А. А. Солнцев.
30. А. с. 1504041 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ слежения по стыку при ЭЛС / А. А. Солнцев.

31. А. с. 1608987 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для слежения за стыком сварного соединения / В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, В. Я. Браверман.

32. А. с. 1608988 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ измерения геометрических параметров электронного луча / В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, В. В. Башенко, А. Д. Тамбовцев, В. Г. Угрюмов.

33. А. с. 1609584 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля процесса электронно-лучевой сварки / В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, А. Д. Тамбовцев, В. Г. Угрюмов.

34. А. с. 1625623 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / В. Д. Лаптенко, В. В. Пономарев.

35. А. с. 315542 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для автоматического слежения за стыком / Е. Н. Бая, Ф. Н. Киселевский, Г. А. Пантелеенко.

36. А. с. 35924 Болгарии, МКИ В 23К 15/00. Способ фокусировки электронного луча при ЭЛС / Ин-т электроники БАН, София. Опубл. 15.08.84.

37. А. с. 367987 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ автоматического слежения за стыком в процессе электронно-лучевой сварки / Е. Н. Бая, Ф. Н. Киселевский, Г. А. Пантелеенко.

38. А. с. 478698 СССР, МКИ В 23К 15/00. Комбинированный датчик / В. Д. Лаптенко, В. А. Сорокин.

39. А. с. 499069 СССР, МКИ В 23К 15/00. Комбинированный датчик / В. Д. Лаптенко, В. А. Сорокин.

40. А. с. 499070 СССР, МКИ В 23К 15/00. Комбинированный датчик / В. Д. Лаптенко, В. А. Сорокин, В. С. Белозерцев.

41. А. с. 534326 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ измерения геометрических параметров технологического электронного луча / В. Ф. Резниченко, А. А. Углов, Д. М. Чесанов.

42. А. с. 607680 СССР, МКИ В 23К 15/00. Комбинированный датчик / В. Д. Лаптенко, В. С. Белозерцев, В. А. Сорокин, В. Я. Браверман.

43. А. с. 715250 СССР, МКИ В 23К 15/00. Комбинированный датчик / В. Д. Лаптенко, В. А. Сорокин, Ю. А. Сохань.

44. А. с. 774847 СССР, МКИ В 23К 15/00. Комбинированный датчик / В. Д. Лаптенко, В. С. Белозерцев, В. А. Сорокин и др.

45. А. с. 804291 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ автоматического слежения за стыком при электронно-лучевой сварке / Л. Н. Гольдфарб, Н. А. Куцаев.

46. А. с. 810408 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство слежения за стыком свариваемых деталей / В. Д. Лаптенко, В. М. Фомин, В. А. Сорокин и др.

47. А. с. 826642 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой обработки / Л. Н. Майоров, Д. Д. Никифоров, М. А. Лифшиц, А. Н. Попов, Е. Н. Балакирев.
48. А. с. 862468 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для измерения диаметра электронного луча / Г. Г. Комиссаров, А. В. Петров и др.
49. А. с. 919822 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство слежения за стыком свариваемых деталей / В. Д. Лаптенко, В. С. Белозерцев, В. А. Сорокин и др.
50. А. с. 942328 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для измерения диаметра электронного луча / Л. Н. Майоров.
51. Акопьянц К. С., Емченок-Рыбко А. В. Контроль фокусировки луча по частоте пульсаций ионного тока // Материалы 8-й Всесоюз. конф. по ЭЛС. М., 1983.
52. Акопьянц К. С., Емченок-Рыбко А. В., Непорожний В. Ю. Определение тока магнитной фокусирующей линзы, необходимого для фокусировки луча при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1985. № 10.
53. Акопьянц К. С., Зубченко Ю. В., Локшин В. Е., Назаренко О. К. Влияние ускоряющего напряжения на параметры проплавления при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1972. № 6.
54. Алексеенко А. Г., Галицын А. А., Иванников А. Д. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры на микропроцессорах: Программирование, типовые решения, методы отладки. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
55. Андреев М. П., Грищенко М. С. Построение информационно-измерительных систем для контроля и управления процессом сварки // Сварочное производство. 1981. № 2. С. 81–86.
56. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. Л.: Энергия, 1969. 168 с.
57. Багаев Б. М., Лаптенко В. Д. Моделирование температурных полей при электронно-лучевой сварке // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 2.
58. Багаев Б. М., Лаптенко В. Д. Программный комплекс «Сварка» // Информ.-поиск. система «Теплопроводность» / МГТУ им. Н. Э. Баумана. 1989. 23 февр. № 9.
59. Балакирев Е. Н., Майоров Л. Н., Лифшиц М. Л. Устройство для получения изображения с помощью вторичных электронов из зоны электронно-лучевой сварки // Сварочное производство. 1979. № 6. С. 73–78.
60. Бая Е. Н., Киселевский Ф. Н., Назаренко О. К. Анализ сигналов датчиков вторичной эмиссии, применяемых в системах автоматического направления электронного пучка по стыку // Автоматическая сварка. 1973. № 3.

61. Баня Е. Н., Киселевский Ф. Н., Назаренко О. К. Об использовании рентгеновских датчиков в системах направления электронного пучка по стыку // Материалы 5-й Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. Киев: Наукова думка, 1977. С. 126–128.
62. Башенко В. В., Мауер К. О., Миткевич Е. А. Использование отраженных электронов для контроля установки луча на стык и параметров стыка при электронно-лучевой сварке // Труды ЛПИ. 1974. № 336. С. 97–100.
63. Беленький В. Я. Прибор для развертки электронного луча и контроля его фокусировки // Сварочное производство. 1988. № 1.
64. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники. М.: Сов. радио, 1969. 98 с.
65. Бронштейн Н. М., Фрайман Б. С. Вторично-электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 468 с.
66. Быстров Ю. А., Иванов С. А. Ускорительная техника и рентгеновские приборы. М.: Высшая школа, 1983. 179 с.
67. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 562 с.
68. Веригин А. М., Шахбенев Г. Г. Микропроцессорная автоматическая система слежения электронного луча по стыку МАСС-1 // Сб. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Электронно-лучевая сварка в машиностроении». Николаев, 1989.
69. Вершинин О. Е. Применение микропроцессоров для автоматизации технологических процессов. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
70. Власов Н. П. Теория линейных следящих систем, работающих на переменном токе. М.: Энергия, 1964.
71. Георгиев Ч., Праматоров Т., Иванов Д., Гаранчева С. Сканирующая система телевизионного наблюдения для сварочных электронно-лучевых установок // Тр. Междунар. конф. по электронно-лучевым технологиям. Варна, 1985. С. 306.
72. Глазер В. Основы электронной оптики. М.: Техтеориздат, 1957.
73. Гончев С. Н., Димов С. Д. Микропроцессорная система для сбора и первичной обработки информации // Междунар. конф. по электронно-лучевым технологиям. Варна, 1985. С. 316–322.
74. Горбунов В. Н., Назаренко О. К., Шаповал В. Н. Система слежения за стыком при ЭЛС // Сб. тр. конф. «Электронно-лучевая сварка». М.: МДНТП, 1986. С. 133–136.
75. Децик В. Н., Децик Н. Н., Нестеренко В. М. Проблемы борьбы с остаточной намагниченностью при ЭЛС ротора газового нагревателя // Электронно-лучевая сварка. М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1986. С. 107–110.

76. Евтифеева Е. С., Кабардина Х. А. Методы экспериментального исследования электронных пучков // Вопросы электротехники. Сер. I. Электроника. 1961. Вып. 8.

77. Зайцев Г. Ф. Анализ линейных импульсных систем автоматического регулирования и управления. Киев: Техника, 1967. 78 с.

78. Занков Хр., Младенов Г. О зависимости глубины проплавления от режима электронно-лучевой сварки / Ин-т электроники БАН, София.

79. Звягин В. Б., Зуев И. В., Подальский В. П., Углов А. А. Расчет и экспериментальное определение распределения плотности тока по сечению электронного луча // Физика и химия обработки материалов. 1979. № 3.

80. Зуев И. В., Углов А. А. Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 5. С. 110–112.

81. Ивей К. А. Системы автоматического регулирования на несущей переменного тока. М.: Машиностроение, 1964.

82. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1970. 832 с.

83. Кривенков В. А., Кроз А. Г. Амплитуда и форма импульса тока вторично-эмиссионного датчика // Прогрессивная технология в сварочном производстве: Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та. Вып. 3. Воронеж, 1972. С. 17–19.

84. Кривенков В. А., Кроз А. Г. Выбор геометрических параметров вторично-эмиссионного датчика для устройств автоматического ведения луча при сварке // Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та. Вып. 3. Воронеж, 1972. С. 214–218.

85. Кривенков В. А., Кроз А. Г. Систематическая погрешность определения координаты стыка разнородных металлов с помощью сканирующего электронного луча // Автоматика, автоматизация измерений // Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та. Вып. 3. Воронеж, 1971. С. 153–158.

86. Кривенков В. А., Кроз А. Г., Рыжков Ф. Н. Помехи в выходном сигнале датчика сканирующих вторично-электронных измерителей отклонения луча от стыка // Сварка электронным лучом: Материалы конф. М.: МДНТП, 1974. С. 92–98.

87. Кривенков В. А., Кроз А. Г., Рыжков Ф. Н., Щербинин И. П. Некоторые пути повышения точности и надежности сканирующих следящих систем для ЭЛС // Автоматика, автоматизация измерений: Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та. Вып. 3. Воронеж, 1971. С. 141–148.

88. Кроз А. Г. Влияние полосы пропускания входных устройств следящей системы на точность слежения при ЭЛС // Прогрессивная технология в сварочном производстве. Воронеж: Воронеж. политехн. ин-т, 1972. Вып. 4. С. 32.

89. Лаптенко В. Д. и др. Создание автоматизированного комплекса для научных исследований и инженерного эксперимента по оптимизации процесса ЭЛС: Отчет по НИР. № ГР 01.87.0074248; Инв. № 02.90012099.

90. Лаптенко В. Д. Исследование устойчивости феррозондового датчика в условиях воздействия электромагнитных полей // Сб. докл. Всесоюз. совещания «Новые методы контроля и автоматического управления сварочными процессами». М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1976.

91. Лаптенко В. Д. Разработка и исследование измерительного устройства с феррозондовым датчиком для системы автоматической ориентации сварной головки по стыку: Дис... канд. техн. наук / МВТУ им. Н. Э. Баумана. М., 1979.

92. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А., Сохань Ю. А. Идентификация электромагнитных полей сварочного тока в зоне стыка: Отчет по НИР. № ГР 01.82.0092982; Инв. № 02.84.00576.87.

93. Лаптенко В. Д., Багаев Б. М. Оптимизация системы стабилизации глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Сб. докл. координац. совещания «Случайный поиск как метод адаптации и оптимизации сложных систем». Красноярск, 1991.

94. Лаптенко В. Д., Башенко В. В., Баякин С. Г. Контроль глубины проплавления при ЭЛС по собственному рентгеновскому излучению // Сб. докл. X-й Всесоюз. конф. «Электронно-лучевая сварка». Л., 1988.

95. Лаптенко В. Д., Башенко В. В., Баякин С. Г., Угрюмов В. Г. Контроль канала проплавления при ЭЛС // Материалы Всесоюз. конф. «Электронно-лучевая сварка». Л., 1988.

96. Лаптенко В. Д., Башенко В. В., Баякин С. Г., Угрюмов В. Г. Контроль и стабилизация глубины проплавления при ЭЛС по рентгеновскому излучению сварочной ванны // Сварочное производство. 1989. № 5.

97. Лаптенко В. Д., Башенко В. В., Мурыгин А. В. Микропроцессорная система слежения по стыку при ЭЛС // Сб. докл. X-й Всесоюз. конф. «Электронно-лучевая сварка». Л., 1988.

98. Лаптенко В. Д., Баякин С. Г., Серегин Ю. Н. и др. Определение режимов оптимального формирования сварного шва при ЭЛС: Отчет по НИР. № ГР 01860093284; Инв. № 02.89.0056793.

99. Лаптенко В. Д., Баякин С. Г., Сорокин В. А. и др. Разработка средств автоматического управления процессом ЭЛС: Отчет по НИР. № ГР 01850003061; Инв. № 02870065372.
100. Лаптенко В. Д., Баякин С. Г., Угрюмов В. Г. Анализ и оптимизация процесса сварки сканирующим электронным лучом // Материалы Всесоюз. конф. «Электронно-лучевая сварка». М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1986.
101. Лаптенко В. Д., Белозерцев В. С., Браверман В. Я., Яковлев А. В. Устройство слежения за стыком при ЭЛС: Каталог № 9 / МВТУ им. Н. Э. Баумана. М., 1984.
102. Лаптенко В. Д., Браверман В. Я. Система для совмещения луча со стыком при электронно-лучевой сварке // Производственно-технический опыт. 1986. № 10.
103. Лаптенко В. Д., Браверман В. Я., Генцелов А. Н., Мурыгин А. В. Применение контроллера «Электроника МС-2702» для управления процессом ЭЛС // Сб. докл. 10-й Всесоюз. конф. / Челябинский политехнический институт. Челябинск, 1988.
104. Лаптенко В. Д., Комолкин Н. В., Белозерцев В. С. и др. Исследование системы автоматического направления электронного луча по стыку // Производственно-технологический опыт. 1979. № 6.
105. Лаптенко В. Д., Мурыгин А. В. и др. Исследование помехоустойчивости рентгеновского датчика стыка в условиях действия случайных и постоянных помех при ЭЛС: Отчет по НИР. № ГР 01.88.0068013.
106. Лаптенко В. Д., Мурыгин А. В. Способ направления электрода по криволинейному стыку // Автоматическая сварка. 1982. № 11.
107. Лаптенко В. Д., Мурыгин А. В., Браверман В. Я. Метод компенсации влияния магнитных полей на точность совмещения луча со стыком при электронно-лучевой сварке // Материалы Всесоюз. конф. «Электронно-лучевая сварка». М., 1986.
108. Лаптенко В. Д., Мурыгин А. В., Браверман В. Я. Расчет отклонения электронного пучка в магнитном поле при электронно-лучевой сварке. Деп. в ВИНТИ 1986, № 5580В86.
109. Лаптенко В. Д., Мурыгин А. В., Тамбовцев А. Д., Угрюмов В. Г. Микропроцессорный блок оперативного контроля плотности распределения энергии и стабилизации диаметра электронного луча // Материалы XI-й Всесоюз. науч.-техн. конф. по ЭЛС, г. Николаев, октябрь 1991 г. Л.: Судостроение, 1991.
110. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А. Браверман В. Я. Применение микропроцессоров и микро-ЭВМ в сварочном оборудовании: Отчет по НИР. № ГР 01.82.0092982; Инв. № 02.86.009.9146.



111. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А. и др. Исследование системы слежения по криволинейному стыку при электронно-лучевой сварке: Отчет по НИР. № ГР 01.82.009282; Инв. № 028.80.06.1910.

112. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А. и др. Разработка средств следящего и программного управления электронно-лучевой сваркой: Отчет по НИР. № ГР 80027671; Инв. № 0285.0060105.

113. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А. Феррозондовый датчик положения сварочной головки относительно стыка // Сварочное производство. 1975. № 5.

114. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А., Белозерцев В. С., Щербаков В. М. Система автоматической ориентации сварочной головки относительно стыка // Сварочное производство. 1976. № 3.

115. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А., Браверман В. Я. Разработка, изготовление и внедрение системы автоматического направления электронного луча по стыку деталей при ЭЛС: Отчет по НИР. № ГР 76038059; Инв. № 02840057927.

116. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А., Литвинов В. П. и др. Анализ и синтез систем слежения по стыку и стабилизация параметров ЭЛС: Отчет по НИР. № ГР 01.82.009282; Инв. № 02870065373.

117. Лаптенко В. Д., Сорокин В. А., Мурыгин А. В. Исследование помех и синтез оптимальных систем слежения при ЭЛС // Отчет по НИР. № ГР 01.82.0092982; Инв. № 02.850060104.

118. Лаптенко В. Д., Угрюмов В. Г. ЭЛС и обработка на предприятиях г. Красноярска, достижения и перспективы // Материалы конф. «Электронно-лучевая сварка», октябрь 1993 г. М.: ЦРДЗ, 1993.

119. Лаптенко В. Д., Браверман В. Я., Угрюмов В. Г. Микропроцессорная система управления электронно-лучевой сваркой // Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Прогрессивные процессы сварки в машиностроении», май 1991 г. Красноярск, 1991.

120. Ластовирия В. Н., Полянский П. В. Система оперативного контроля проплавливающих свойств электронного пучка при сварке // Сварочное производство. 1990. № 8.

121. Лившиц М. Л., Виноградов В. А. и др. Использование автоматической телевизионной системы слежения при ЭЛС в серийном производстве // Вопросы атомной науки и техники, сварочное производство. 1981. Вып. 2. С. 86–89.

122. Локшин Ю. Н. Точность экспериментальной оценки распределения плотности тока по сечению электронного луча // Автоматическая сварка. 1984. № 4. С. 69–70.

123. Мауэр К. О. Исследование возможности использования излучения заряженных частиц при ЭЛС применительно к автоматическо-

му регулированию процесса: Дис... канд. техн. наук / Ленингр. политехн. ин-т. Л., 1974. 213 с.

124. Мельник И. М., Сидоренко В. Н., Гушин А. В. Оптимальное по качеству наведение электронного луча на стык свариваемых изделий // Адаптивные системы автоматического управления. Киев, 1986. № 14. С. 40–42.

125. Мельник И. М., Тычинский А. А., Иванов В. Т. Автоматизация электронно-лучевой сварки изделий // Технология и автоматизация машиностроения. Киев, 1983. № 31.

126. Москалев В. А., Шустаков В. Г. Контроль и измерение параметров пучков зараженных частиц. М.: Атомиздат, 1973.

127. Назаренко О. К. Отклонение пучка электронов при ЭЛС // Автоматическая сварка. 1982. № 1. С. 33–39.

128. Назаренко О. К., Локшин В. Е., Акопьянц К. С. Измерение параметров мощных электронных пучков методом вращающегося зонда // Электронная обработка материалов. 1970. № 1. С. 87–90.

129. Непорожний В. Ю. Устройство для компенсации остаточного магнитного поля при электронно-лучевой сварке толстолистовых сталей // Автоматическая сварка. 1984. № 3. С. 68–70.

130. Пастушенко Ю. Н. Корреляционная обработка вторично-эмиссионных сигналов при ЭЛС // Автоматическое управление технологическим процессом ЭЛС: Сб. науч. тр. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. С. 47–52.

131. Пастушенко Ю. Н., Горбунов В. И., Спекаль А. П. Программная система управления электронно-лучевой сваркой // Сварочное производство. 1984. № 2. С. 33.

132. Пат. 1453526 Великобритании, МКИ В 23К 15/00. Способ и устройство для контроля глубины проплавления при электронно-лучевой сварке / Б. Е. Патон и др. Оpubл. 27.10.76.

133. Пат. 1493524 Великобритании, МКИ В 23К 15/00. Способ определения проплавления свариваемого изделия. Оpubл. 30.11.77.

134. Пат. 2087114 Франции, МКИ В 23К 15/00. Способ и устройство для слежения за швом при ЭЛС / Ф. Карсель, Ж. Анжели, Ж. Делор. Оpubл. 31.12.71.

135. Пат. 2139191 Франции, МКИ В23К 15/00. Способ и устройство для телевизионного наблюдения свариваемой заготовки при операции электронно-лучевой сварки. Оpubл. 5.01.73.

136. Пат. 2284874 Франции, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля и стабилизации глубины проникновения и устройство, реализующее указанный способ / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев и др. Оpubл. 09.04.74.

137. Пат. 2360829 ФРГ, МКИ В 23К 15/00. Способ и устройство для измерения диаметра фокального пятна на обрабатываемой детали при использовании электронно-лучевой сварочной установки / Н. В. Подола, А. П. Облонский, Е. Л. Цоколь. Опубликовано. 27.04.78.
138. Пат. 2937646 ФРГ, МКИ В 23К 15/00. Способ и устройство слежения по стыку при ЭЛС/ П. Ритц, Б. Спис. Опубликовано. 11.12.80.
139. Пат. 4243866 США, МКИ В 23К 15/00. Способ получения электронного луча изменяемого диаметра и устройство для его осуществления/ Н. Армонт.
140. Полянский П. В. «Электроника БК-0010» в системах исследования объектов с распределенными параметрами // Микропроцессорные средства и системы. 1989. № 3. С. 58–60.
141. Прозоровский А. Н., Живага Л. Н. Устройство слежения электронного пучка за стыком // Сварочное производство. 1984. № 2.
142. Прозоровский А. Н., Живага Л. Н. Устройство слежения электронного пучка за стыком с V-образной разделкой кромок // Сварочное производство. 1985. № 3.
143. Прозоровский А. Н., Живага Л. Н. Устройство слежения электронного пучка за стыком // Сварочное производство. 1984. № 2.
144. Рентгеновские лучи / Пер. с нем. и англ.; Под ред. М. А. Блохина. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
145. Рубинович И. М., Кисс П. Э., Новиков В. С., Петушенко В. Ф., Свирякин Д. Н. Контроль электронно-лучевой сварки по характеристикам распределения рентгеновского излучения / Том. политехн. ин-т. Томск, 1988. Деп. в «Информэлектро» 01.04.88, № 121-эт88.
146. Рыжков Ф. И., Щербинин И. П., Кривенков В. А. Следящая система с периодическим контурным сканированием для электронно-лучевой сварки // Автоматическая сварка. 1972. № 1.
147. Рыкалин Н. Н. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы. М.: Наука, 1985.
148. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. С. 17–25.
149. Акцепт. заявка 2937646 ФРГ, МКИ В 23К 15/00. Способ и устройство слежения электронного луча при электронно-лучевой сварке / П. Ритц, Б. Шпис. Заявл. 18. 09. 79.
150. Спыну Г. А., Пастушенко Ю. Н. Расчет вторично-эмиссионных сигналов и защищенности от помех систем автоматического направления электронного луча по стыку // Автоматическая сварка. 1973. № 10. С. 5–9.
151. Спыну Г. А., Пастушенко Ю. Н., Локшин В. Е. Современные вторично эмиссионные системы автоматического направления

пучка электронов по стыку при сварке // Автоматическая сварка. 1978. № 10. С. 18–22.

152. Спыну Г. А., Пастушенко Ю. Н., Локшин В. Е., Коротун Ю. М. Современные вторично-эмиссионные системы автоматического направления пучка электронов по стыку при сварке // Автоматическая сварка. 1978. № 10.

153. Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. Н. Теоретические основы информационной техники. М.: Энергия, 1971. 334 с.

154. Тэреда Ура. Исследования способа обнаружения границы проплавления при электронно-лучевой сварке / Пер. с яп. ТТП Москвы № 19263 от 29.11.87. М., 1987.

155. Углов А. А., Селищев С. В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. М.: Наука, 1987.

156. Филиппов Л. Г., Фрейдзон Н. Р., Давидовичу А., Дятку Э. Мини- и микроЭВМ в управлении промышленными объектами. Л.: Машиностроение, 1984.

157. Заявка № 61-119389 Японии / Фукуда Сиро, Мицубиси денки к. к. Оpubл. 06.06.86.

158. Хара К и др. Установка для электронно-лучевой сварки с программным управлением от ЭВМ для авиационной промышленности / Пер. с яп. ВЦП № М-03756 от 12.02.86.

159. Хара К. Новая машина для электронно-лучевой сварки с программным управлением / Пер. с яп. ВЦП № М-03755 от 12.03.86.

160. Хараджа Ф. Н. Общий курс рентгенотехники. Л.: Энергия, 1966.

161. Харисон Т. Управляющие вычислительные машины в АСУ технологическими процессами. М.: Мир, 1976.

162. Харкевич А. А. Избранные труды: В 3 т. Т. 3. М.: Наука, 1973. 524 с.

163. Хиромато С., Ямане Е., Мориясу М. и др. Система отслеживания положения сварного шва при электронно-лучевой сварке, работающая в реальном масштабе времени / Пер. с яп. КР ВЦП № КН-01207 от 29.03.87.

164. Черепнин Ф. Б., Крепышев В. Н., Дроздов В. Г., Меркель М. С. Стенд для размагничивания конструкций перед сваркой // Автоматическая сварка. 1981. № 3. С. 58–61.

165. Шиллер Э., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. М.: Энергия, 1980.

166. Электронно-лучевая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987.

167. Пат. 4219719 США / Ю. Фрозьен, Х. Решне. Оpubл. 26.08.80. (Патенто-владелец – фирма «Сименс Акиенгезельшафт» (ФРГ).)

168. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Физматгиз, 1963. 848 с.
169. Anderl P., Monk C., Paul W., Steigerwald K. Automatische Stenerung des Elektronenstrahl Schweißprozesses mit Schweisszusatz in der Beangigkeit von den Werkstruckabmessung und magnetischen Storfeldern // DVS Berichte 63 / Steigerwald Strahltechnik GmbH Puchheim. Munchen, 1963. P. 3–10.
170. Bakish R. Twenty five years electron beam welding in the US // 3-rd int. Collog. Weld. Melt. Electrons and Laser Beam, 5–9 sept. 1983. Lion, 1983. P. 895–902.
171. Blakeley R. T., Sanderson A. The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding // Weld J. 1984. Vol. 63. № 1. P. 42–49.
172. Carrol M. J., Powers D. E. Automatic joint for CNC-programmed electron beam welding // Weld. J. 1985. Vol. 64. № 8. P. 34–38.
173. Cooper J. C., Previs A., Schumacher B. W. Closed-loop beam Position controller for electron beam welding // DVS-Ber. 1980. Vol. 63. P. 20–25.
174. Ctorbunov V. C., Lokshin V. E., Nazarenko O. K. Seam-tracking in electron beam welding of thick metal // 1 st. Int. Conf. Adv. Weld Syst., London, 19–21 Nov. 1985. Abington, 1987. P. 359–365.
175. Echhorn F., Panten M., Spies B., Depner K. Application of high power EB Welding // Electron and Laser Beam Weld., Proc. Int. Conf., Tokyo, 14–15 July 1986. Oxford, 1986. P. 183–192.
176. Eichhorn F., Spies B., Rits P. Computer controlled sistem to measure EB geometry // IIV DOC № IV, 224-78. Aachen, 1978.
177. Furner A. J. Electron beam welding thic section presipitation hardening steel // Weld J. 1981. № 1. P. 18–66.
178. Hiromoto S., Yamare Y., Moriyasu M., Amine M. // Muzubisy denky zuxo. 1985. Vol. 59. № 5. P. 394–398.
179. Kerner F., Schuler A. High resalution method for determination of current density dictubution in clectron beams of arbitrary shope // 3eme Collog. int. coudage etfision faisceau electrons et laser, Lion, 5–9 sept. 1983. Vol. 1. S. I., 1983. P. 45–52.
180. Kihara H., Minehisa S., Sacabata N., Shibuya X. High power electron beam welding of thick steel plates. Method for elimination beam deflection coused // Weld. Wold. 1984. Vol. 22. № 516. P. 126–136.
181. Mauer K. O. Systems zuz strahl-stoß Positionierung beim Elektronenstrahlsch-weißen // Schweißtochnin. 1982. Bd. 32. № 8. S. 368–373.
182. Mauer K. O. Systems zuz strahl-stoß Posionierung beim Elektronenstrahlsch-weißen // Schweißtochnin. 1982. Bd. 32. № 8. S. 368–373.

183. Mauer K., Noller F. Automatische Fokussierung des Elektronenstrahls beam Electroningtrahlshweißen // DVS Ber. 1980. № 63. P. 43–47.
184. Muller M. Electron beam welding – a fully automatic welding process // Dev. Innov. Improved weld. Prod., I-st. int. conf., Birmingham, 13–15 sept. 1983. Abington, 1984. P. 32/1–32/8.
185. Murakami H., Iwami T., Yasunaga S. Automatic positioning sistem for electron beam welding // IECON 84. Proc. Int. Conf. Ind. Electron. Contr. and Instrum., Tokyo, 22–26 Oct. 1984. Ind. Appl. Microelectron. Vol. 1. New York, 1984. P. 545–536.
186. Ning Feizhang, Zhao Huizhe. // Weld Inst. 1987. № 3. P. 114–122.
187. Panten M., Eichhorn F., Spies B. Diagnosis of high energy density electron beam on electron beam welding machines with a new compact measuring equipment // 4eme Collog. int. coudage et fusion faisceau electrons et laser, Cannes, 26–30 sept. 1988. Vol. 1. Saclay, 1988. P. 53–60.
188. Pat. 3766355 USA, MKU B 23K 15/00. Apparatus for use with Electron Beam Welding Machines / E. Kottkamp. Publ. 23.08.71.
189. Pat. 1585918 Great Britan. A method of setting a path for d charge corrier beam of charge carrier beam apparatus and charge carrier beam apparatus with means for carrying out the method / W. Scheffels. Publ. 11.03.81.
190. Pat. 4223200 USA, MKU B 23K 15/00. Charged particle beam processing with magnetic field compensation / C. Mocnch, W. Scheffels, D. Konly, K. H. Steigerwald. Publ. 16.09.80.
191. Roudier R. Quelgues equipements resents de soudage par FE pour aeronautique // Soudage at techn. connexes. 1986. Vol. 40. № 9–10. P. 325.
192. Sasaki S., Murakami H., Iwami T., Yasunaga S. Automatic Weld line sensing and work positioning for electron beam welding // IIW DOC 4-368-84 (1984).
193. Sayegh G. Considerations surleg diflerentes methodes utilisees dans l'analyse des caracterestigues des faisceaux d'elctron // IIW Doc. № IV, 276–79. S. I., 1980. 17 p.
194. Sobisch G. Anwendung einer mikrorechnerges teurten Elektronenstrahlsh-weißanlage fur Forschung und Production // Zis Mitt. 1984. Vol. 26. № 1. P. 12–16.
195. Sun Naiwen, Ding Peifan. A new seam tracking sistem with differen tial feed-back of the reflected electrons during the EB welding // 4eme Collog. int. coudage et fusion faisceau electrons et laser, Cannes, 26–30 sept. 1988. Vol. 2. Saday, 1988. P. 775–778.
196. Watanabe K., Shida T., Susuki H., Okamura H. A study on occurence and prevention of defects of EBW (report 2) // J. Jap. Weld Sos. 1975. Vol. 44. № 2. P. 121–127.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Электронно-лучевая сварка как объект управления</b> .....	5
1.1. Физические основы электронно-лучевой сварки .....	5
1.2. Взаимосвязь параметров процесса и геометрии шва .....	15
1.3. Автоматическое управление процессом электронно-лучевой сварки .....	18
1.3.1. Системы для совмещения электронного пучка со стыком свариваемого изделия .....	19
1.3.2. Системы контроля и управления энергетическими параметрами электронного пучка .....	28
1.3.3. Системы контроля и стабилизации глубины проплавления .....	32
<b>Выводы</b> .....	33
<b>Глава 2. Метод синхронного детектирования для получения информации о положении стыка и плоскости фокусировки</b> .....	35
2.1. Математическая модель вторично-эмиссионного датчика положения стыка .....	35
2.2. Статические характеристики датчика .....	45
2.3. Спектральные характеристики датчика .....	50
2.4. Построение измерительных устройств по методу синхронного детектирования .....	54
<b>Глава 3. Математическая модель рентгеновского датчика положения стыка</b> .....	59
3.1. Математическая модель рентгеновского датчика положения стыка .....	63
3.2. Математическая модель коллимированного рентгеновского датчика положения стыка .....	68
<b>Глава 4. Анализ помехоустойчивости измерительных устройств для контроля положения стыка</b> .....	73
4.1. Входное воздействие .....	74

4.2. Координаты пучка	75
4.3. Помеха, обусловленная неоднородностью поверхности свариваемого изделия .....	87
4.4. Помеха, обусловленная наводками на датчик положения стыка .....	99
4.5. Анализ помехоустойчивости измерительных устройств	103
4.5.1. Анализ помехоустойчивости измерительного устройства, работающего по методу синхронного детектирования	104
4.5.2. Анализ помехоустойчивости измерительного устройства, работающего по методу развертывающего преобразования	108
4.5.3. Метод синхронного накопления .....	110
4.6. Приведение помехи ко входу измерительного устройства	113
<b>Глава 5. Системы контроля и стабилизации плотности распределения энергии по сечению пучка .....</b>	<b>117</b>
5.1. Математическая модель рентгеновского датчика для контроля плотности распределения энергии по сечению луча	117
5.2. Способы фокусировки электронного пучка	131
5.3. Вопросы технической реализации системы .....	133
<b>Глава 6. Анализ методов контроля и стабилизации глубины проплавления .....</b>	<b>148</b>
6.1. Анализ рентгеновского излучения сварочной ванны .....	148
6.2. Способ контроля и стабилизации глубины проплавления по рентгеновскому излучению сварочной ванны, измеряемому со стороны электронно-лучевой пушки	156
6.3. Способ контроля и стабилизации глубины проплавления с рентгеновским датчиком, размещенным с обратной стороны сварного шва .....	163
<b>Глава 7. Вопросы технической реализации комплекса средств автоматического управления ЭЛС</b>	<b>173</b>
7.1. Реализация систем слежения по стыку и фокусировки с предварительной записью программы	174
7.2. Реализация слежения по стыку на рабочем токе	189



7.3. Микропроцессорная АСУ ТП ЭЛС .....	200
7.4. Применение средств контроля и управления для экспериментальных исследований и оптимизации процесса ЭЛС .....	205
<b>Выводы</b> .....	<b>216</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>217</b>

*Научное издание*

**Лаптенко Валерий Дмитриевич, Мурыгин Александр Владимирович,  
Серегин Юрий Николаевич, Браверман Вадим Яковлевич**

**УПРАВЛЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ  
СВАРКОЙ**

*Редактор Е. Г. Некрасова*

*Корректор Л. В. Звонарева*

Лицензия ЛР № 020314 от 18.02.97

Подп. в печать 20.11.2000. Формат 60×84/16. Бумага офисная.  
Печать плоская. Уч.-изд. л. 15,11. Усл. печ. л. 13,6. Тираж 200 экз.

Заказ С 21

Редакционно-издательский отдел САА.

660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.