На правах рукописи

Коваленко Артем Валерьевич

Синхронизация в системе ЧПУ геометрических и электрических осей электронно-лучевой установки с целью повышения эффективности сварки авиационных конструкций

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)

Специальность 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2009

Работа выполнена в ОАО «Национальный институт авиационных технологий» (г. Москва).

Научный руководитель: кандидат технических наук
Плихунов Виталий Валентинович

Научный консультант: доктор технических наук, доцент
Мартинов Георги Мартинов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Фролов Евгений Борисович

кандидат технических наук
Денисов Борис Семенович

Ведущая организация: **ОАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество»**

Защита состоится «22» апреля 2009 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.142.03 в ГОУ ВПО Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН» по адресу: 127994, Москва, Вадковский пер., д. 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН».

Автореферат разослан «20» марта 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент Семячкова Е.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях развития авиационной промышленности проблема повышения качества сварных соединений, призванных заменить сборные конструкции наиболее нагруженных узлов летательных аппаратов, является одной из самых актуальных. Одним из видов технологического оборудования, способного обеспечить высокое качество сварки деталей из тугоплавких и химически активных металлов, используемых при изготовлении летательных аппаратов, являются электронно-лучевые установки (ЭЛУ).

Анализ современного рынка ЭЛУ отечественного производства выявил следующие проблемы:

отсутствие на рынке (в первую очередь, российском) не только серийно выпускающихся современных систем управления для ЭЛУ, но даже единой концепции их построения;

большинство используемых на ЭЛУ систем управления российского производства построены по децентрализованной схеме на базе двух персональных компьютеров (ПК), где один компьютер управляет взаимным перемещением свариваемых деталей и электронно-лучевой пушки (ЭЛП) друг относительно друга, а другой – параметрами электронного луча. При этом, синхронизация управления необходимых перемещений и изменения параметров электронного луча производится оператором в ручном или полуавтоматическом режиме;

время, затрачиваемое на отработку технологического процесса электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для передачи его в серийное производство, является недопустимо большим для современного авиационного производства;

в зависимости от сложности сварного стыка, соотношение изделий, отправляемых на исправление при серийном изготовлении, к общему объему производства колеблется от 3% до 16%, из которых порядка 10% являются бракованными.

Определено, что наиболее прогрессивной архитектурой системы управления ЭЛУ является построение такой системы на базе одного вычислительного устройства (системы ЧПУ), синхронно управляющего параметрами электронного луча, оформленными в виде электрических осей, и взаимными перемещениями свариваемых деталей и ЭЛП, реализуемыми при помощи геометрических осей. В рамках диссертационной работы такое устройство получило название специализированной системы ЧПУ.

В этой связи, тема диссертационной работы, направленной на повышение эффективности сварки авиационных конструкций путем синхронизации в системе ЧПУ геометрических и электрических осей ЭЛУ, является актуальной.

Цель работы. Повышение производительности технологического процесса и качества ЭЛС элементов авиационных конструкций путем применения специализированной системы ЧПУ, позволяющей синхронно управлять геометрическими и электрическими осями.

Задачи исследования. Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать и определить возможность применения в качестве специализированной системы ЧПУ представленные на рынке модели систем управления ведущих мировых производителей.

2. Исследовать особенности управления процессом ЭЛС для выявления его управляемых параметров.
3. Построить математическую модель специализированной системы ЧПУ, включающую модуль управления ЭЛП и модуль видеоконтрольного устройства (ВКУ).
4. Реализовать опытный образец специализированной системы ЧПУ на основании разработанной модели.
5. Внедрить специализированную систему ЧПУ на установке «ЭЛУ-20АМ», используемой для сварки длинномерных титановых деталей типа «лонжерон» в опытном производстве ОАО «Национальный институт авиационных технологий» («НИАТ»).

Методы исследования. Теоретические исследования в работе базировались на методах системного анализа, объектно-ориентированного проектирования (декомпозиции, абстракции), концепции объектно-ориентированного программирования и теории автоматического управления (ТАУ).

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

на основании выявленных взаимосвязей разработан метод синхронизации управления параметрами электронного луча (электрические оси) и взаимными перемещениями свариваемых деталей и ЭЛП (геометрические оси) в рамках одной системы ЧПУ, значительно повышающий производительность ЭЛУ и обеспечивающий высокое качество изделий, получаемых методом ЭЛС;

построена математическая модель специализированной системы ЧПУ, основанной на открытой коммерческой системе управления класса PCNC, реализующая синхронное управление геометрическими и электрическими осями;

разработана функциональная модель модуля управления ЭЛП, что позволяет в рамках одной специализированной системы ЧПУ управлять электронным лучом;

разработана функциональная схема ВКУ высокой четкости, характеризующегося малой восприимчивостью к внешним помехам и позволяющего с высокой точностью реализовать функцию определения координат стыка свариваемых деталей в автоматическом режиме.

Практическая значимость. Практическая значимость работы состоит в разработке методики построения специализированной системы ЧПУ, предназначенной для синхронного управления геометрическими и электрическими осями ЭЛУ, что позволяет повысить эффективность сварки авиационных конструкций.

Реализация и внедрение. Результаты работы внедрены и использованы на установке «ЭЛУ-20АМ», применяемой в опытном производстве ОАО «НИАТ».

Апробация работы. Теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на заседаниях кафедры «Компьютерные системы управления» МГТУ «СТАНКИН», заседаниях научно-технического совета ОАО «НИАТ», научно-технической конференции «XVII научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов» (РКК «Энергия», Королев, 2005 г.), научно-практической конференции «Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения» (КГТУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2008 г.), научном семинаре «Системы управления, искусственный интеллект и качество программного обеспечения» (ИКТИ РАН, Москва, 2009 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных ра-

бот.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из: введения, пяти глав, заключения, выводов, списка литературы из 78 наименований. Основная часть работы изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, отмечена ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе на основе научных трудов специалистов в области автоматизации производственных процессов и разработки систем ЧПУ – Соломенцева Ю.М., Сосонкина В.Л., Мартинова Г.М., Фролова Е.Б., Митрофанова В.Г., Горнева В.Ф., а также специалистов в области технологии и оборудования для ЭЛС – Белянина П.Н., Глазова С.И., Магнитова В.С., Денисова Б.С., Назаренко О.К., Башенко В.В., проведен анализ технологического процесса ЭЛС и принципов построения систем управления технологическим оборудованием, реализующим этот процесс.

Выявлены три возможных варианта построения специализированной системы ЧПУ:

1. В ПК промышленного исполнения устанавливаются платы согласования, обеспечивающие связь с модулями управления электродвигателями и силовым блоком ЭЛП, а также плата программируемого логического контроллера для работы с периферийными устройствами. Ядром системы управления при этом является комплекс программ, реализующих геометрическую и логическую задачи.
2. В ядро открытой коммерческой системы ЧПУ внедряется программный модуль, реализующий через плату согласования управление силовым блоком ЭЛП. Алгоритм работы этого программного модуля во многом аналогичен алгоритму работы модулей управления электродвигателями.
3. В качестве дополнения к коммерческой системе ЧПУ разрабатывается модуль управления ЭЛП, генерирующий управляющие сигналы для силового блока на основании данных, полученных из системы ЧПУ. Данный модуль подключается к базовой системе ЧПУ по промышленной шине, используемой также для связи с модулями управления электродвигателями.

Идентичным для всех трех вариантов является способ реализации ВКУ: аналоговый сигнал, полученный от чувствительного элемента (коллектора электронов) в вакуумной камере, оцифровывается при помощи платы расширения и передается в систему ЧПУ, где обрабатывается специальным программным модулем.

Основным недостатком первого варианта является избыточная трудоемкость его реализации, сопряженная с разработкой всего необходимого программного обеспечения (ПО), включая интерпретатор управляющих программ, математический аппарат для расчета и управления необходимыми перемещениями (интерполятор), а также программируемый логический контроллер в случае его программной реализации.

Основным недостатком второго варианта является отсутствие возможности приобретения пакета открытой архитектуры, являющегося опциональным для

большинства современных систем ЧПУ. Это связано с запретом западных производителей на поставку данной опции российским предприятиям.

Третий вариант лишен вышеописанных недостатков, что делает его наиболее приемлемым для реализации. Таким образом, в результате анализа выбран третий вариант, в соответствии с особенностями которого предложена функциональная схема специализированной системы ЧПУ (Рис. 1).

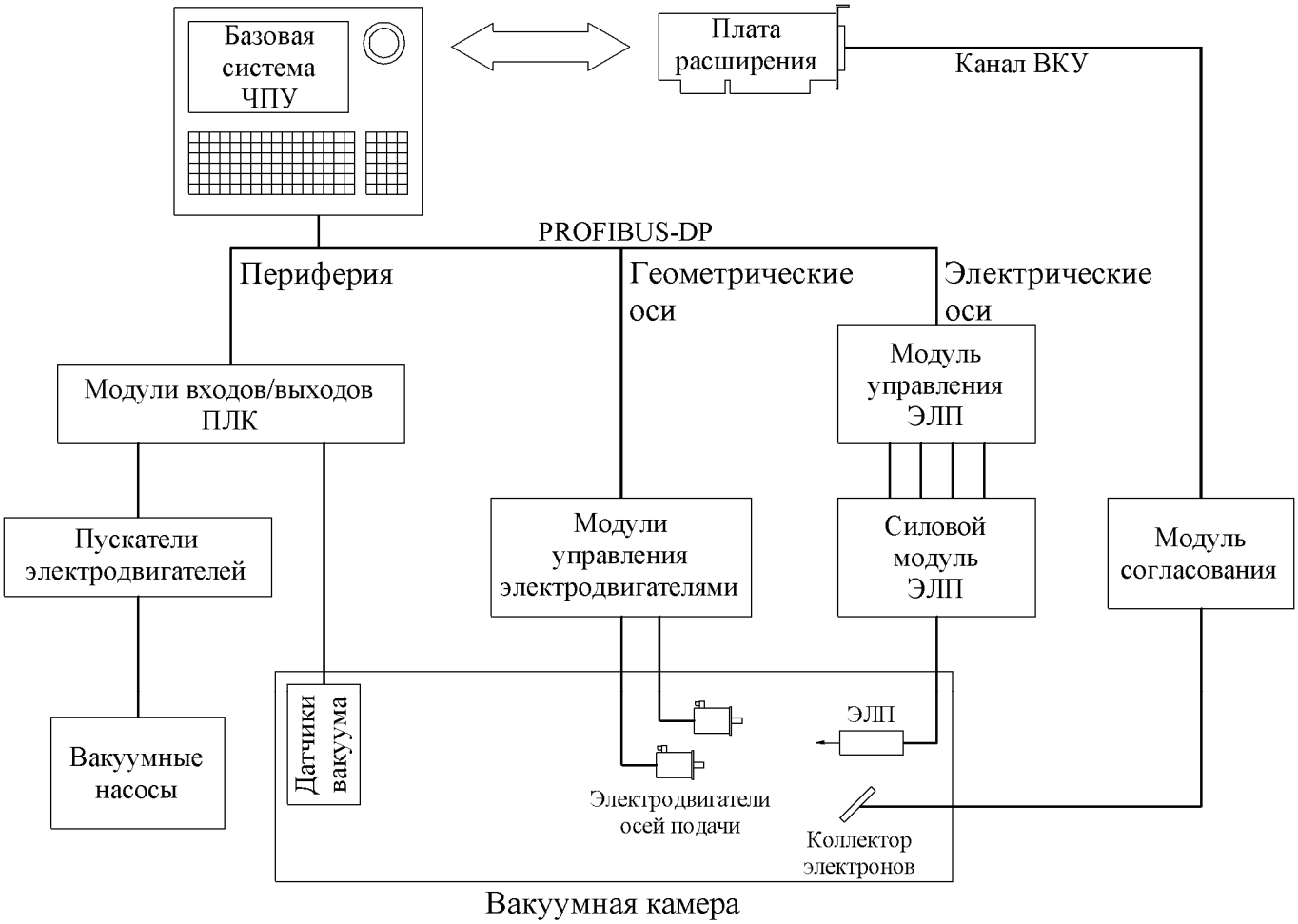


Рис. 1. Функциональная схема специализированной системы ЧПУ

На основании данной функциональной схемы сформулированы требования, предъявляемые ко всем компонентам, входящим в состав специализированной системы ЧПУ:

базовая система ЧПУ должна быть построена по архитектуре PCNC-4 и иметь не менее одного слота для установки плат расширения или заменяющего его разъема универсальной последовательной шины USB;

базовая система ЧПУ должна обладать возможностью одновременной интерполяции не менее чем пяти геометрических осей, а также иметь запас не менее чем из четырех одновременно интерполируемых осей для реализации управления параметрами электронного луча;

модуль управления ЭЛП должен использовать для соединения с системой ЧПУ промышленную шину, аналогичную используемой модулями управления электродвигателями.

Табл. 1. Сравнительная таблица основных параметров систем ЧПУ ведущих мировых производителей

Наименование параметра	GE FANUC 18i model B	Siemens SINUMERIK 840Di sl	Power Automation PA 8000e	Heidenhain iTNC 530	Rexroth IndraMotion MTX advanced
Архитектура	PCNC-4	PCNC-4	PCNC-4	PCNC-2	PCNC-4
Максимально допустимое количество осей (для одного блока ЧПУ)	8, возможно расширение путем установки дополнительных модулей	20	64	8, возможно программное расширение до 16	64
Максимальное количество осей на один канал	8	12	10	8	8
Шины для подключения модулей управления электродвигателями	FANUC Serial Servo Bus, FANUC I/O Link	PROFIBUS-DP, возможна реализация аналогового управления посредством ANA-модулей	PA SDI-Bus, SERCOS-III, аналоговый ±10 В	SERCOS-III, аналоговый ±10 В	SERCOS-III, аналоговый ±10 В
Шины для подключения периферии	PROFIBUS-DP, FL-net, DeviceNet, Asi, I/O Link-II	MPI, PROFIBUS-DP	PA Superbus, PROFIBUS-DP, DeviceNet, CANopen	PROFIBUS-DP, DeviceNet, CANopen	PROFIBUS-DP, DeviceNet
Наличие слотов расширения	нет	1 x PCI с возможностью расширения за счет замены стандартных комплектующих	2 x PCI с возможностью расширения за счет замены стандартных комплектующих	нет	1 x PCI с возможностью расширения за счет замены стандартных комплектующих
Разъемы для подключения вычислительных устройств и устройств ввода-вывода	2 x COM, 1 x Ethernet	2 x PS/2, 4 x USB, 2 x COM, 1 x LPT, 1 x VGA, 1 x Ethernet	2 x PS/2, 4 x USB, 1 x COM, 1 x LPT, 1 x VGA, 1 x Ethernet	2 x USB, 1 x COM, 1 x VGA, 1 x Ethernet	2 x PS/2, 4 x USB, 1 x COM, 1 x LPT, 1 x VGA, 1 x Ethernet

Дополнительно проведен сравнительный анализ флагманских систем ЧПУ ведущих мировых производителей с целью определения модели, наиболее подходящей для использования в качестве базы для построения специализированной системы ЧПУ (Табл. 1). В процессе анализа рассматривались системы: GE FANUC 18i model B, Siemens SINUMERIK 840Di solution line, Power Automation PA 8000e, Heidenhain iTNC 530 и Rexroth IndraMotion MTX advanced. В результате анализа, а также учитывая наличие опыта длительного сотрудничества с фирмой Siemens, выбор остановлен на системе SINUMERIK 840Di solution line.

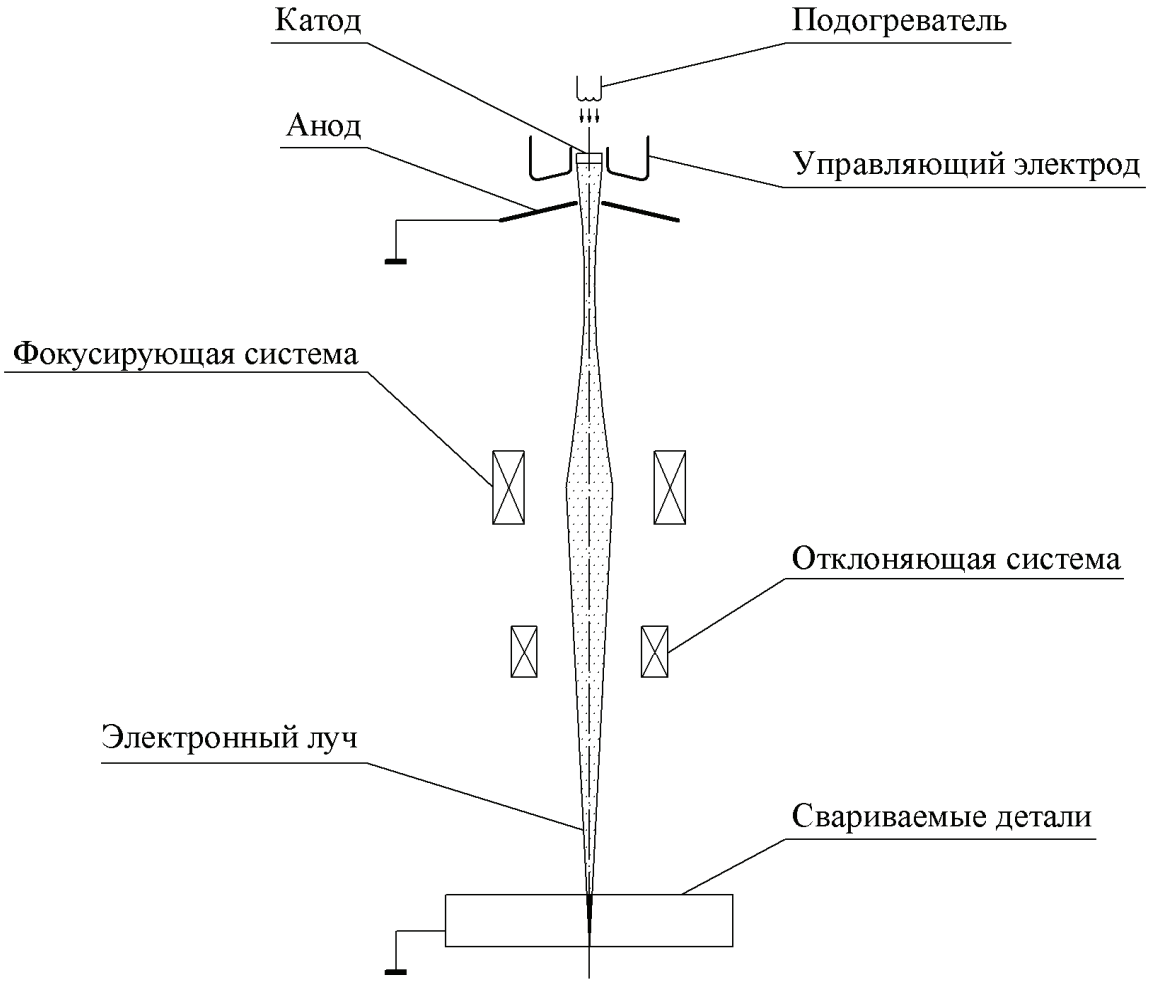


Рис. 2. Принцип работы ЭЛП

На основе проведенного анализа и выявленных проблем, поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе проведено исследование процесса управления ЭЛП с целью выявления управляемых параметров, а также определения способов автоматизации сварочного процесса и сопутствующих ему операций. Проанализирована схема устройства ЭЛП, функциональная схема ЭЛУ, технологический процесс ЭЛС.

Принцип работы ЭЛП представлен на Рис. 2. Электроны, эмитированные катодом и ускоренные напряжением между катодом и анодом (ускоряющим напряжением), направляются в рабочую камеру установки. Дальнейшее формирование электронного луча производится при помощи фокусирующей системы, а его направление корректируется отклоняющей системой.

В ходе исследования выделены основные параметры, характеризующие про-

цесс ЭЛС, определены их особенности и выявлены взаимосвязи между ними (Рис.3).

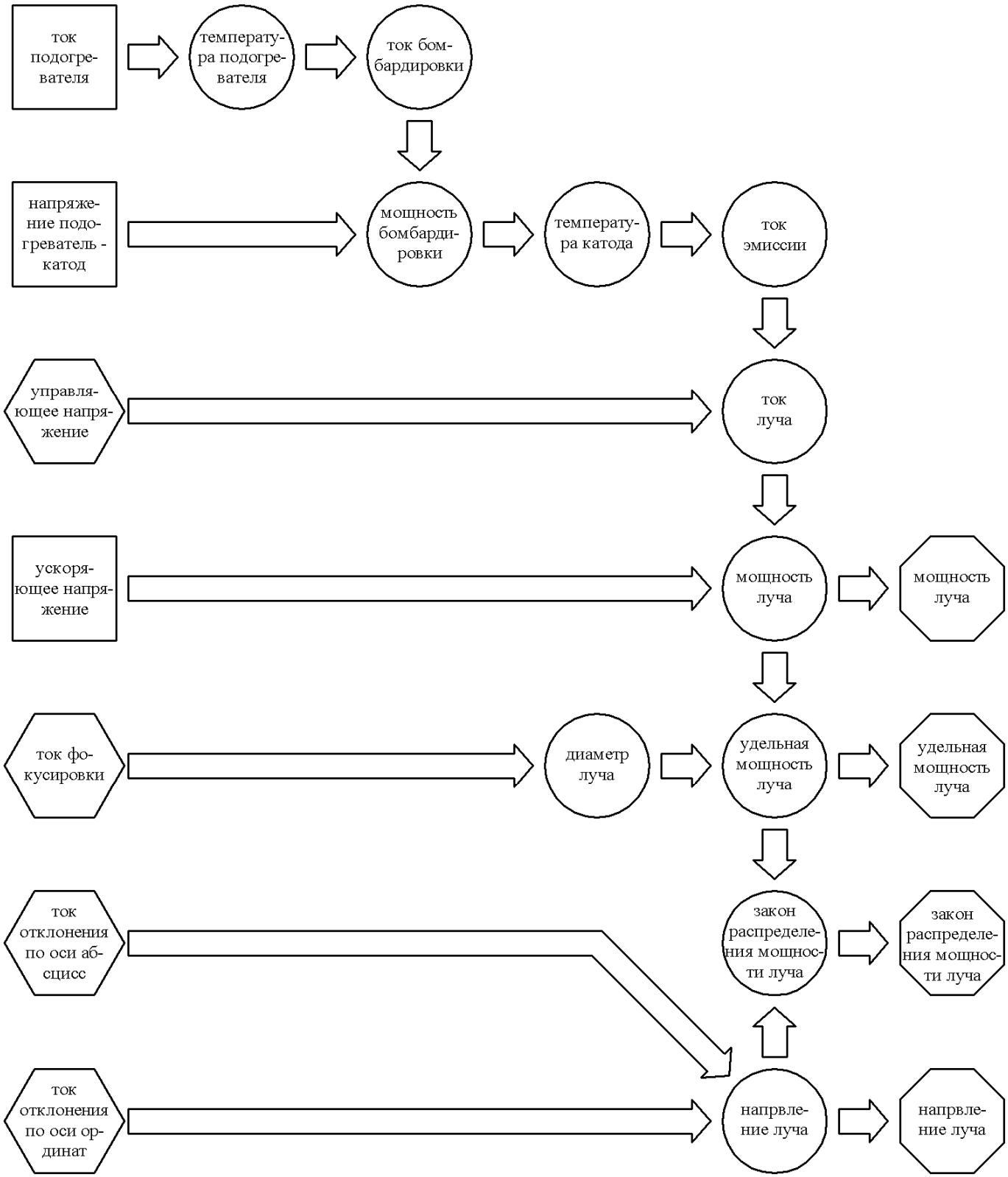


Рис. 3. Обобщенная схема взаимосвязей параметров ЭЛС

Мощность луча определяется как произведение ускоряющего напряжения и силы тока луча, которая, в свою очередь, определяется силой тока эмиссии катода и величиной напряжения между катодом и прикатодным управляющим электродом

(управляющего напряжения). В большинстве ЭЛП применяется термоэмиссионный катод, и сила тока эмиссии имеет нелинейную зависимость от его температуры, что является крайне неудобным для управления. Зависимость силы тока эмиссии от температуры катода в таких ЭЛП определяется уравнением Ричардсона:

$$I_Э = A \cdot T^2 \cdot S \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \qquad \textbf{(1)}$$

где:

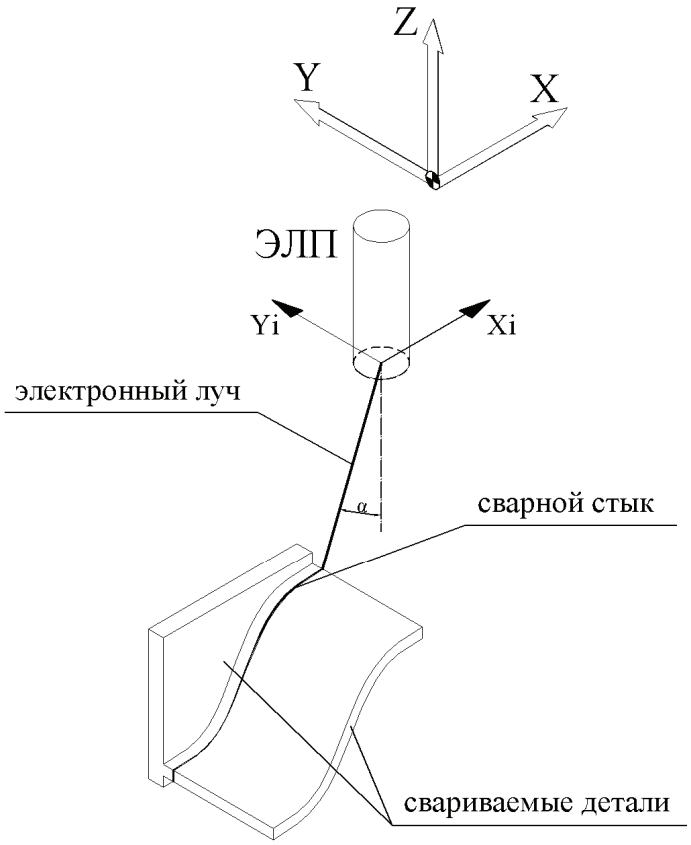
$I_э$ – ток эмиссии;

T – температура катода;

S – эмитирующая площадь катода;

A, b – постоянные, зависящие от материала катода.

Помимо этого, процесс изменения температуры катода в значительной мере инерционен, что дополнительно затрудняет управление силой тока эмиссии. Ускоряющее напряжение также не подходит для управления мощностью луча, так как от величины данного напряжения зависит дальность пробега электронов.



Параметры электронного луча:

- мощность луча;
- фокусировка луча;
- отклонение луча по оси абсцисс (X_i) в системе координат ЭЛП;
- отклонение луча по оси ординат (Y_i) в системе координат ЭЛП.

Электрические оси, реализованные в ЭЛП:

$\mathbf{I_b}$ - ось тока электронного луча;

$\mathbf{I_f}$ - ось тока фокусировки электронного луча;

$\mathbf{I_x}$ - ось отклонения электронного луча по оси абсцисс (X_i) в системе координат ЭЛП;

$\mathbf{I_y}$ - ось отклонения электронного луча по оси ординат (Y_i) в системе координат ЭЛП.

Рис. 4. Схема ЭЛС

Таким образом, температура катода, а также влияющие на ее величину параметры (ток подогревателя и напряжение между подогревателем и катодом) отнесены к контролируемым параметрам, а управление током луча реализовано при помощи изменения напряжения между катодом и управляющим электродом. Ускоряющее напряжение также отнесено к контролируемым параметрам.

Управление фокусировкой луча, определяющей его удельную мощность в месте контакта со свариваемыми изделиями, реализовано путем изменения силы тока фокусирующей системы, представляющей собой магнитную линзу, состоящую из

электрической катушки, ось которой совпадает с осью луча.

Отклонение электронного луча осуществляется путем изменения сил токов двух составляющих отклоняющей системы, направленных вдоль оси абсцисс (X_i) и оси ординат (Y_i) системы координат ЭЛП.

Таким образом, в результате исследования определены четыре управляемые и три контролируемые параметра ЭЛС. Управляемые параметры оформлены в виде электрических осей (Рис. 4) специализированной системы ЧПУ.

Третья глава посвящена разработке математической модели модуля управления ЭЛП.

Проведен анализ принципа работы модулей управления электродвигателями, а также возмущающие воздействия, приложенные к их компонентам. В соответствии с положениями ТАУ составлена их обобщенная функциональная схема (Рис. 5), в которой каждый элемент характеризуется собственной передаточной функцией:

$W_S(p)$ – контур положения;
$W_v(p)$ – контур скорости;
$W_I(p)$ – контур тока (ускорения);
$W_{УМ}(p)$ – усилитель мощности;
$W_{ЭД}(p)$ – электродвигатель;
$W_{OC\text{-}S}(p)$ – датчик положения;
$W_{OC\text{-}v}(p)$ – датчик скорости;
$W_{OC\text{-}I}(p)$ – датчик тока (ускорения).

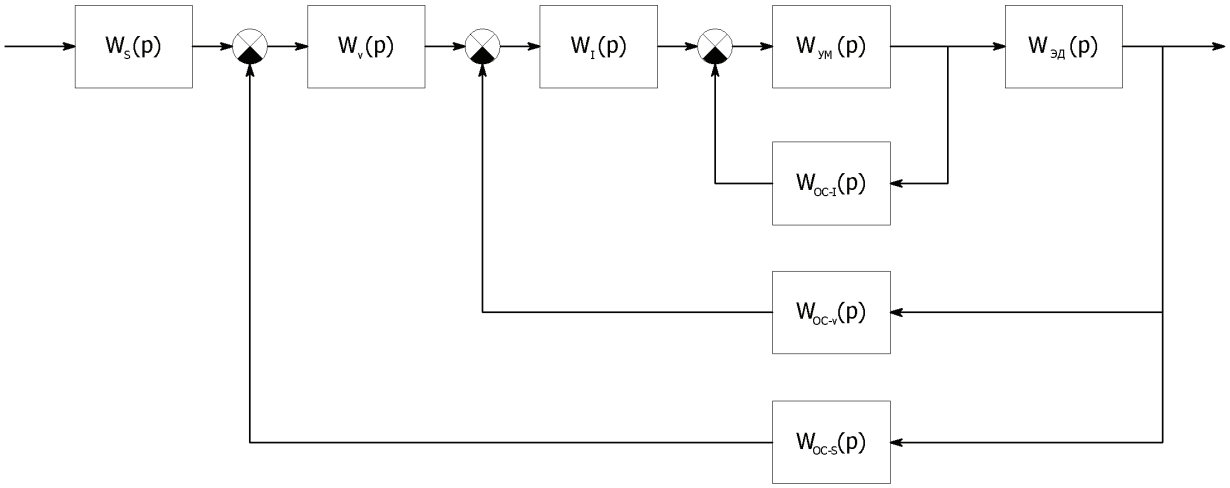


Рис. 5. Обобщенная функциональная схема модуля управления электродвигателем

Общую передаточную функцию модуля, построенного по данной схеме, можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} W_{K-I}(p) = W_I(p) \cdot \dfrac{W_{УМ}(p)}{1 + W_{УМ}(p) \cdot W_{OC-I}(p)} \cdot W_{ЭД}(p) \\ W_{K-v}(p) = W_v(p) \cdot \dfrac{W_{K-I}(p)}{1 + W_{K-I}(p) \cdot W_{OC-v}(p)} \\ W_{K-S}(p) = W_S(p) \cdot \dfrac{W_{K-v}(p)}{1 + W_{K-v}(p) \cdot W_{OC-S}(p)} \end{cases} . \quad \textbf{(2)}$$

С учетом особенностей всех составляющих схемы, ее передаточную функцию можно записать в более подробном виде:

$$\begin{cases} W_{K-I}(p) = K_I \cdot \dfrac{1}{T_I \cdot p + 1} \cdot \dfrac{W_{УМ}(p)}{1 + W_{УМ}(p) \cdot K_{OC-I}} \cdot W_{ЭД}(p) \\ W_{K-v}(p) = K_v \cdot \dfrac{1}{T_v \cdot p + 1} \cdot \dfrac{W_{K-I}(p)}{1 + W_{K-I}(p) \cdot K_{OC-v} \cdot p} \\ W_{K-S}(p) = K_S \cdot \dfrac{W_{K-v}(p)}{1 + W_{K-v}(p) \cdot K_{OC-S}} \end{cases}, \quad \textbf{(3)}$$

где:

K_I – коэффициент усиления в контуре управления током;
T_I – период интегрирования в контуре управления током;
K_v – коэффициент усиления в контуре управления скоростью;
T_v – период интегрирования в контуре управления скоростью;
K_S – коэффициент усиления в контуре управления положением;
$K_{OC\text{-}I}$ – коэффициент усиления датчика обратной связи по току;
$K_{OC\text{-}v}$ – коэффициент усиления датчика обратной связи по скорости;
$K_{OC\text{-}S}$ – коэффициент усиления датчика обратной связи по положению.

В соответствии с требованиями к модулю управления ЭЛП, его алгоритм работы должен быть аналогичен алгоритму работы модулей управления электродвигателями. На основании этого положения разработана функциональная схема модуля управления ЭЛП (Рис. 6).

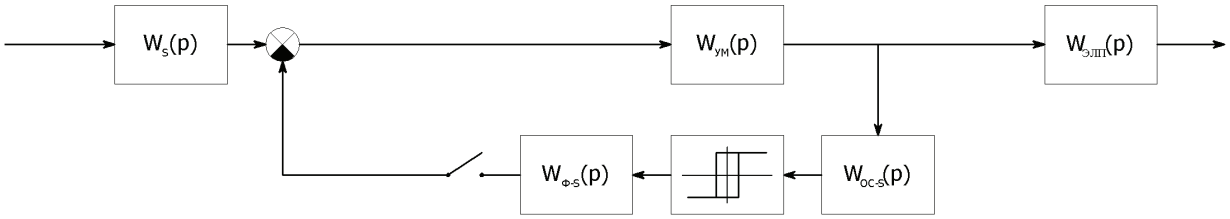


Рис. 6. Функциональная схема модуля управления ЭЛП

Передаточная функция такого модуля имеет вид:

$$W(p) = W_S(p) \cdot \frac{W_{УМ}(p)}{1 + W_{УМ}(p) \cdot W_{OC-S}(p)} \cdot W_{ЭЛП}(p), \quad \textbf{(4)}$$

где:

$W_S(p)$ – контур величины;
$W_{УМ}(p)$ – усилитель мощности;
$W_{ЭЛП}(p)$ – ЭЛП;
$W_{OC\text{-}S}(p)$ – датчик величины.

С учетом выражений**:**

$$W_S(p) = K_S, \quad \textbf{(5)}$$

$$W_{OC-S}(p) = K_{OC-S} \quad \textbf{(6)}$$

– передаточную функцию модуля можно представить в следующем виде:

$$W(p) = K_S \cdot \frac{W_{УМ}(p)}{1 + W_{УМ}(p) \cdot K_{ОС-S}} \cdot W_{ЭЛП}(p), \qquad \textbf{(7)}$$

где:

K_S – коэффициент усиления в контуре управления величиной;

$K_{OC\text{-}S}$ – коэффициент усиления датчика обратной связи по величине

Зона нечувствительности в отрицательной обратной связи предназначена для устранения эффекта «дребезга» датчика при малых амплитудах сигнала.

Особенностями такой схемы являются:

наличие только одной обратной связи – по управляемой величине, что связано с отсутствием возможности контроля производных управляющей величины первого и более высоких порядков;

возможность отключения обратной связи, обусловленная вероятным отсутствием датчиков обратной связи, связанным с отсутствием возможности или необходимости в измерении значения управляемого параметра.

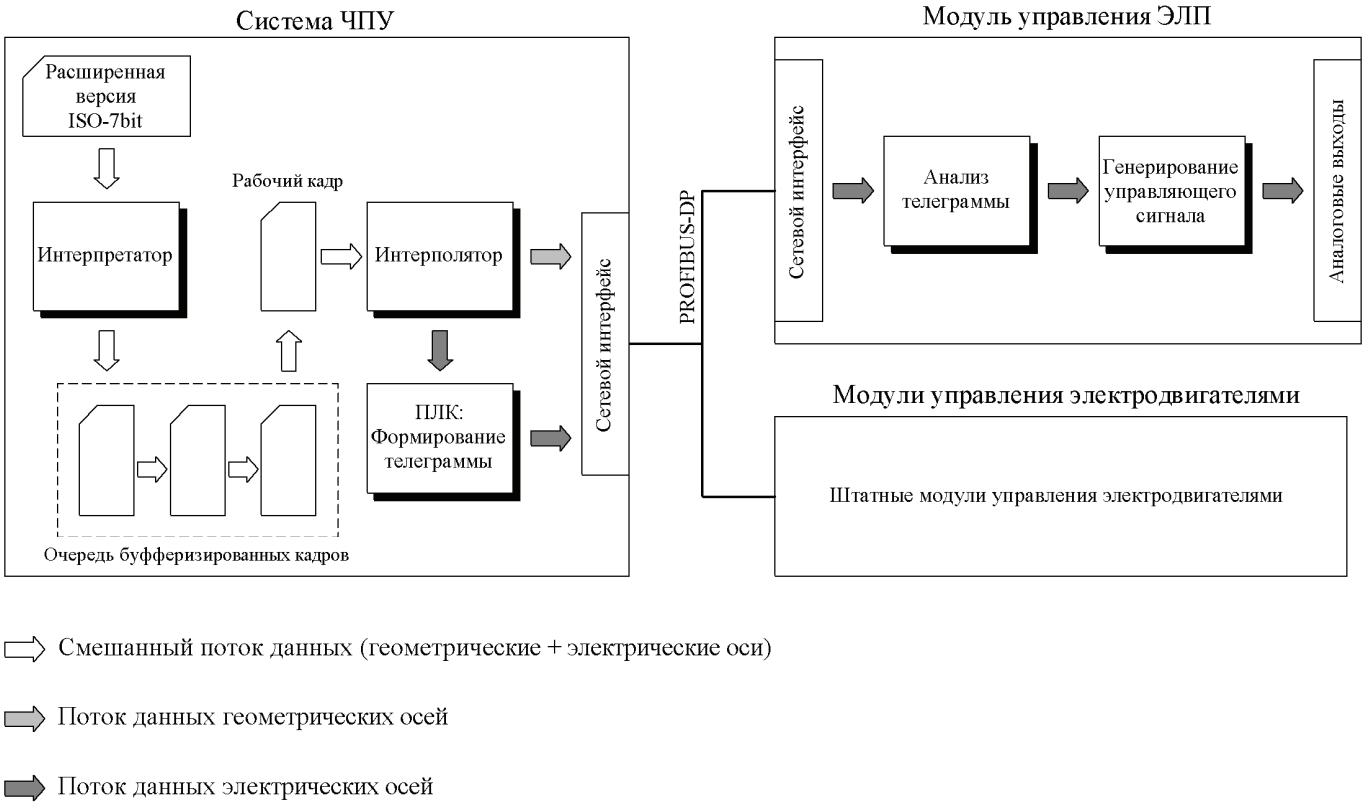


Рис. 7. Конвейер обработки данных специализированной системы ЧПУ

Четвертая глава посвящена созданию модуля управления ЭЛП и модуля ВКУ, а также способа их интеграции в специализированную систему ЧПУ.

В соответствии с разработанными функциональными схемами модуля управления ЭЛП и системы управления в целом, предложен алгоритм работы конвейера обработки данных специализированной системы ЧПУ (Рис. 7). Для коммутации модуля управления ЭЛП с блоком базовой системы ЧПУ использована универсальная промышленная шина PROFIBUS-DP, предназначенная также для связи с модулями

управления электродвигателями.

Для аппаратной реализации модуля управления ЭЛП выбран быстродействующий контроллер SIMATIC FM 458-1 DP производства немецкой фирмы Siemens. Согласование данного модуля с базовой системой ЧПУ происходит следующим образом. На основании мгновенных значений координат и типа интерполяции для каждой электрической оси программируемый логический контроллер, входящий в состав базовой системы ЧПУ, формирует телеграмму со специфическим заголовком, отличным от заголовков телеграмм, предназначенных для модулей управления электродвигателями. Далее данная телеграмма направляется на сетевой интерфейс и по шине PROFIBUS-DP передается в модуль управления ЭЛП. На основании ее содержания данный модуль формирует один из шести типов сигнала (Рис. 8):

фиксированное значение;

значение, полученное путем линейной интерполяции между двумя заданными;

значение, полученное путем круговой интерполяции между двумя заданными (параметры интерполяции задаются отдельно);

активация генератора сигнала типа «синусоида» с заданной частотой;

активация генератора сигнала типа «пила» с заданной частотой;

активация генератора сигнала ступенчатого типа с заданными частотой и количеством ступеней на период.

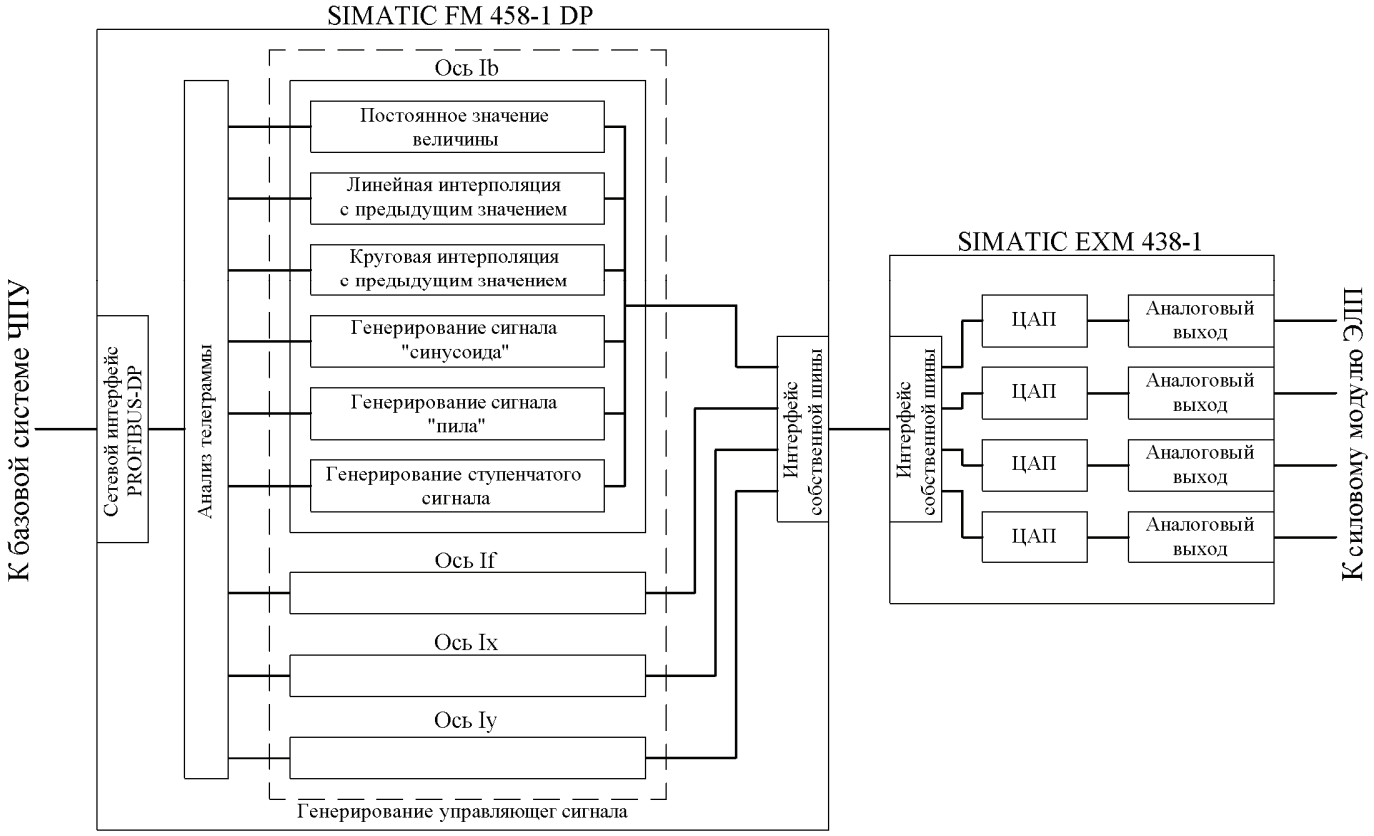


Рис. 8. Принцип работы модуля управления ЭЛП

Дополнительно в рамках создания специализированной системы ЧПУ разработан модуль ВКУ высокой четкости – другой модуль, отличающий такую систему от аналогов, применяемых на механообрабатывающем технологическом оборудовании. ВКУ предназначено для определения координат стыка свариваемых деталей, а

также может использоваться для визуального контроля качества сварного шва находящихся в вакуумной камере деталей.

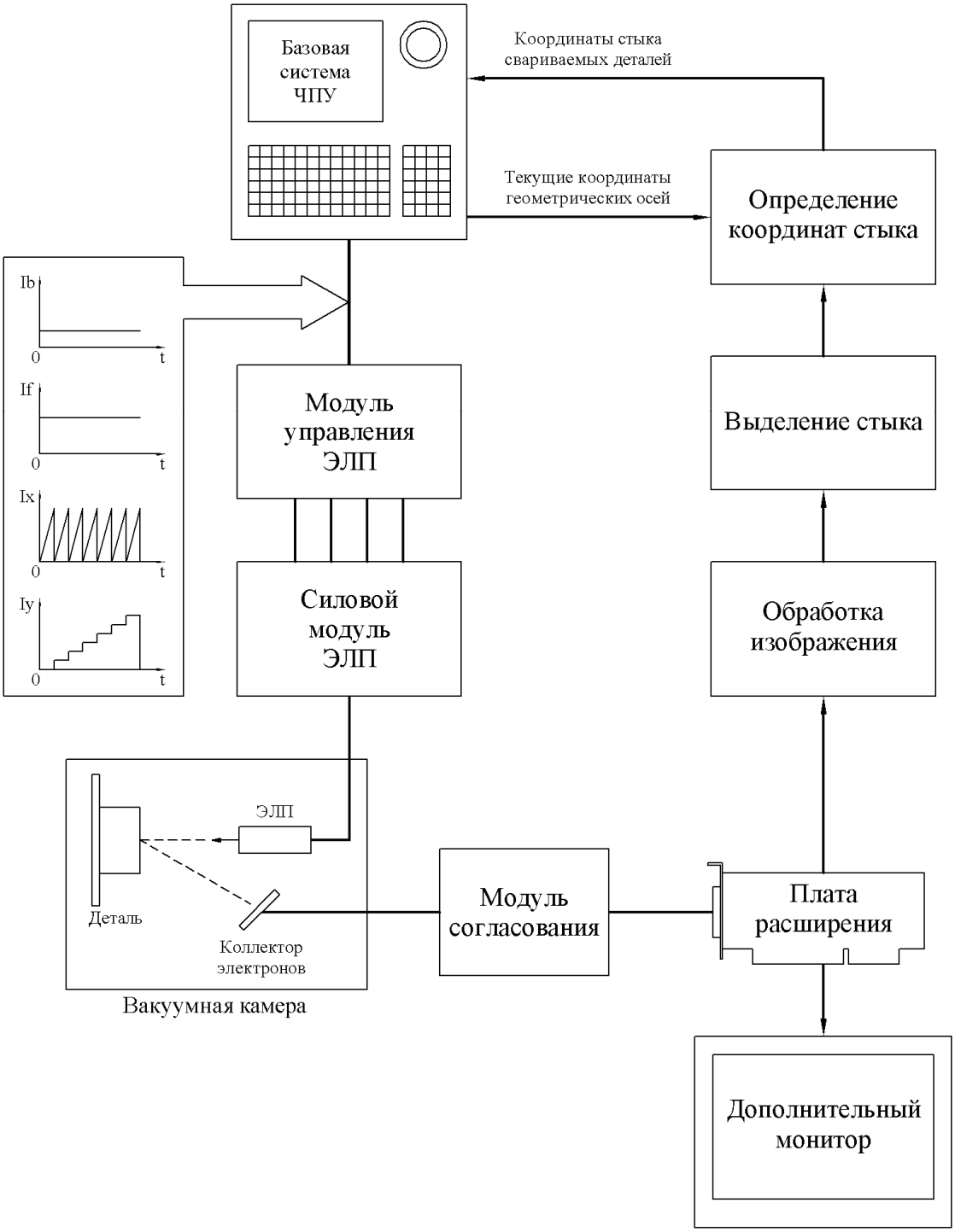


Рис. 9. Принцип работы ВКУ

Принцип работы ВКУ проиллюстрирован на Рис. 9. На канал оси абсцисс (X_i) отклоняющей системы ЭЛП подается сигнал формы «пила» с частотой f_{Xi}=3840 Гц, а на канал оси ординат (Y_i) – сигнал ступенчатой формы с частотой f_{Yi}=10 Гц и количеством ступеней 768. Таким образом, обеспечивается построчное сканирование прямоугольного участка детали размером 102.4x76.8 мм с разрешением 0.2 мм и частотой 10 кадров в секунду. Само сканирование производится при малом токе электронного луча (0.5..1.0 мА), недостаточном для расплавления деталей.

Попадая на поверхность детали, электронный луч вызывает эмиссию вторичных электронов, улавливаемых коллектором электронов, установленным рядом с ЭЛП. На основании сигнала, поступающего с коллектора, формируется монохромное растровое изображение, транслируемое на дополнительный монитор, входящий в состав панели оператора.

Путем программного анализа данного изображения и выделения стыка свариваемых деталей, может осуществляться автоматическое определение координат стыка с последующей их записью в управляющую программу. Это позволяет реализовать составление управляющей программы (обучение системы ЧПУ) в автоматическом режиме.

ВКУ реализовано в виде отдельного канала. Для обеспечения получения и обработки системой сигнала с коллектора электронов задействован аналогово-цифровой преобразователь платы L-Card L783, установленной в слот PCI блока базовой системы ЧПУ.

В пятой главе рассмотрены результаты практического внедрения специализированной системы ЧПУ на установке «ЭЛУ-20АМ», используемой в опытном производстве ОАО «НИАТ».

В качестве образца для анализа результатов внедрения выбран экспериментальный лонжерон коробчатого типа, используемый в настоящее время в конструкции крыла разрабатываемых перспективных летательных аппаратов. Он представляет собой тонкостенную сварную конструкцию из титанового сплава ВТ-6 (Рис. 10).

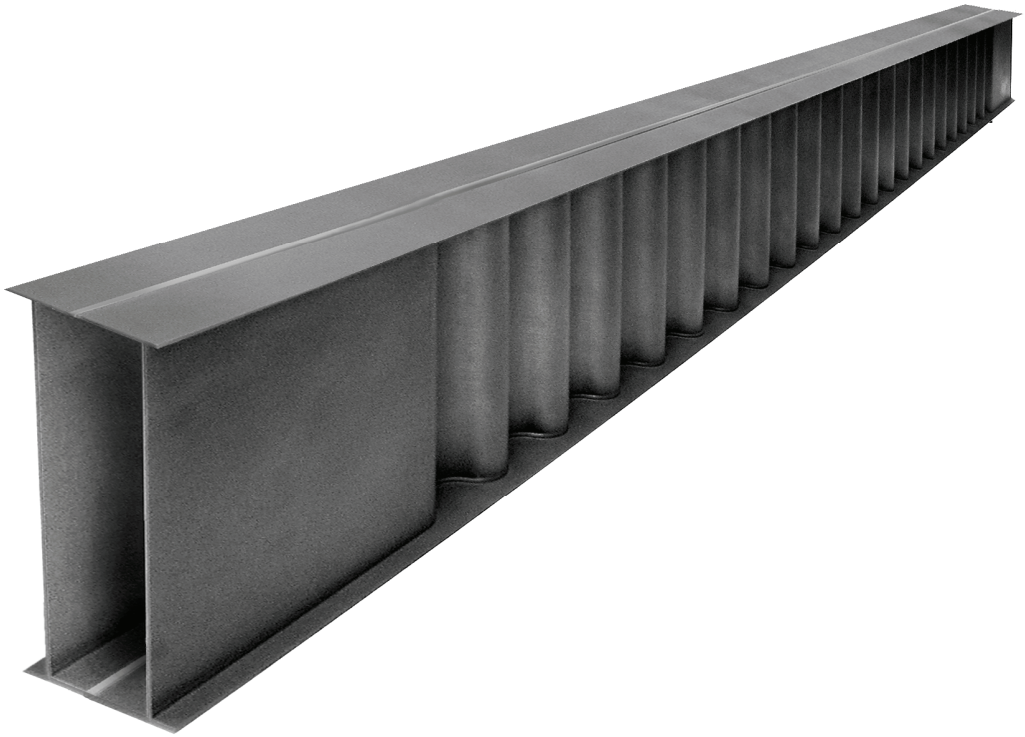


Рис. 10. Экспериментальный лонжерон коробчатого типа

Ввиду химических свойств титана, сварку экспериментального лонжерона коробчатого типа возможно производить только в защитной среде либо в вакууме – в противном случае сварной шов окажется загрязненным различными химическими

соединениями титана и не будет обладать должными характеристиками.

По окончании изготовления тестовой партии экспериментальных лонжеронов коробчатого типа проведен сравнительный анализ результатов, полученных до и после внедрения специализированной системы ЧПУ, показавший, что:

реализована возможность поиска стыка свариваемых деталей и фиксирования его координат с высокой точностью в автоматическом режиме за счет применения нового ВКУ, обладающего высокой разрешающей способностью и малой восприимчивостью к внешним помехам, что позволило значительно ускорить процесс обучения системы ЧПУ, сократив тем самым время подготовки к сварке;

достигнута высокая точность фокусировки электронного луча на стыке свариваемых деталей и стабильность параметров технологического процесса ЭЛС за счет устранения влияния человеческого фактора на синхронизацию управления параметрами ЭЛП и взаимными перемещениями ЭЛП и свариваемых деталей, что позволило получить качественный сварной шов за один проход, повысив тем самым качество изготавливаемого изделия, а также сократив суммарное время обработки;

общее время обработки одной детали в ЭЛУ сократилось со 136 до 70 минут.

В заключении приводится описание возможных путей развития специализированной системы ЧПУ, а также вариантов ее применения, выходящих за рамки диссертационной работы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. За счет создания и внедрения специализированной системы ЧПУ решена задача повышения эффективности применения ЭЛУ, включающая: повышение качества ЭЛС (уменьшение количества брака с 16% до 2% в сварных соединениях наибольшей сложности), сокращение времени на всех этапах цикла проведения ЭЛС в 1.5-2.5 раза, снижение себестоимости проведения работ по изготовлению деталей с помощью ЭЛС в 2-3 раза. Решение данной задачи имеет важное значение для авиационной промышленности.
2. Выявлены взаимосвязи между параметрами, управляющими процессом ЭЛС (электрические оси), и взаимными перемещениями свариваемых деталей и ЭЛП (геометрические оси), особенностью которых является то, что их использование в математической модели специализированной системы ЧПУ позволяет повысить точность синхронизации геометрических и электрических осей.
3. По совокупности результатов проведенных исследований разработана математическая модель специализированной системы ЧПУ, отличающаяся от традиционной модели наличием модуля управления ЭЛП для проведения сварки в вакууме и модуля ВКУ для осуществления наведения на стык свариваемых деталей. Построена схема программно-аппаратной реализации специализированной системы ЧПУ на базе открытой коммерческой системы управления класса PCNC.
4. Разработана функциональная модель модуля управления ЭЛП. Отличительной особенностью данного модуля является реализация следующих электрических осей: ось тока луча, ось тока фокусировки луча, оси токов магнитных линз, отклоняющих луч по осям абсцисс и ординат системы координат пушки.
5. Разработана функциональная схема модуля ВКУ высокой четкости, особенно-

стью которого является малая восприимчивость к внешним помехам, что позволило получить изображение стыка свариваемых деталей с малым зазором (менее 0.5 мм) и реализовать определение координат данного стыка в автоматическом режиме.

6. Технологической процесс ЭЛС экспериментальных образцов авиационных конструкций в опытном производстве ОАО «НИАТ» рекомендуется осуществлять на установке «ЭЛУ-20АМ» под управлением созданной специализированной системы ЧПУ.

7. Полученные теоретические и практические результаты исследований рекомендуется использовать в высших учебных заведениях при подготовке бакалавров, магистров, инженеров, а также научных кадров, в частности в учебной дисциплине «Структура и математическое обеспечение систем управления» кафедры «Компьютерные системы управления» ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Коваленко А.В. Виды сплайновой пятиосевой обработки деталей ракетных аппаратов на многокоординатных обрабатывающих центрах // Доклады XVII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов – 5-9 декабря 2005, Королев. – Королев: РКК «Энергия», 2006. Том 2, С. 32-36.

2. Плихунов В.В., Шлесберг И.С., Коваленко А.В. Функциональные возможности систем ЧПУ и перспективы их применения на современном машиностроительном производстве // Авиационная промышленность. 2007. – №1. – С. 42-46.

3. Коваленко А.В. Перспективные способы изготовления деталей летательных аппаратов на многокоординатных обрабатывающих центрах // Доклады международной научно-практической конференции «Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения» – 12-13 августа 2008, Казань. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2008. Том 3, С. 185-189.

4. Плихунов В.В., Шлесберг И.С., Коваленко А.В., Омельченко И.С. Перспективы развития систем управления установками электронно-лучевой сварки // Авиационная промышленность. 2008. – №4. – С. 16-20.

5. Мартинов Г.М., Плихунов В.В., Коваленко А.В. Расширение функциональных возможностей системы ЧПУ для управления установкой электронно-лучевой сварки // Авиационная промышленность. 2009. – №1. – С. 16-21.