

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

**ЦЫБУЛЬКИН**  
*Геннадий Александрович*

УДК 621.791

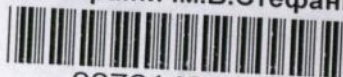
**КОРРЕКТИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОГРАММНЫМ  
ДВИЖЕНИЕМ  
СВАРОЧНЫХ АВТОМАТОВ И РОБОТОВ**

05.13.07 —

автоматизация технологических процессов и производств

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Киев 1995



Диссертация является руко  
Работа выполнена в Инстит  
НАН Украины

Официальные оппоненты:

академик НАН Украины  
доктор технических наук  
ТИМОФЕЕВ В.Б.

доктор технических наук  
профессор  
ЧЕРНЫШ В.П.

доктор технических наук  
профессор  
КУЗНЕЦОВ В.И.


Ведущая организация - Институт кибернетики им. В.М. Глушкова  
НАН Украины

Защита состоится " 6 " декабря 1985 г. в часов  
на заседании специализированного совета Д 50.02.01 при  
Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (252850  
Киев-5 ГСП ул. Боженко, 11).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Автореферат разослан " 29 " октября 1985 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
канд. техн. наук

  
БЕРНАДСКИЙ В.И.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и состояние проблемы. Существенное повышение качества промышленной продукции, гарантирующее ее конкурентоспособность на мировом рынке, неразрывно связано с повышением требования к точности систем управления различного рода оборудованием, входящим в состав автоматизированных технологических комплексов, в частности, систем управления сварочными, газорезательными и чертежно-графическими автоматами, координатографами, промышленными роботами, манипуляторами и металлообрабатывающими станками. В связи с этим разработка эффективных методов повышения точности систем указанного класса представляется весьма актуальной.

Большой вклад в решение проблем, связанных с автоматизацией и роботизацией производства, внесли Б.Е.Патон, В.К.Лебедев, В.И.Скурихин, Б.Б.Тимофеев, А.Г.Ивахненко, Г.А.Спыну и многие другие ученые. Из огромного количества опубликованных работ по данной проблематике значительная их часть так или иначе посвящена вопросам повышения точности систем управления программным движением. Общие методы решения указанных вопросов дает теория многосвязных систем, получившая существенное развитие в работах В.Т.Морозовского, О.С.Соболева, А.А.Туника, В.И.Гостева, П.Ф.Осмоловского, Б.И.Кузнецова, М.Мезагович, М.Соловь и ряда других ученых. Повышение точности систем управления программным движением в рамках этой теории сводится фактически к уменьшению динамических ошибок локальных воспроизводящих систем (ЛВС), входящих в состав многоканальных систем управления. Такой традиционный подход достаточно эффективен, если отдельные каналы слабо взаимосвязаны или их взаимодействием можно пренебречь, а программно заданные и желаемые траектории движения рабочего инструмента непременно совпадают. На практике же такое предположение часто не выполняется. Например, при роботизированной дуговой сварке желаемые траектории, т.е. линии свариваемых соединений, из-за неточности изготовления и установки деталей под сварку могут, как известно, существенно не совпадать с заданными траекториями. Очевидно, что в таких ситуациях, независимо от того, какими бы высокими точностными характеристиками не обладали

ЛВС, точность движения по желаемым траекториям может оказаться недопустимо низкой. Иначе говоря, традиционные методы повышения точности здесь малоэффективны. Нужны, очевидно, совсем другие подходы. Впрочем, даже в том идеальном случае, когда желаемые траектории совпадают с траекториями, заданными программно, точность движения определяется непосредственно не вектором динамических ошибок ЛВС, как это может показаться на первый взгляд, а проекцией вектора на нормаль к заданной траектории. Следовательно, для повышения точности движения по траекториям вовсе не обязательно повышать точность ЛВС, а достаточно лишь обеспечить поворот вектора координатных ошибок или его смещение, т.е. обеспечить коррекцию соотношений между динамическими ошибками ЛВС, коррекцию скорости или коррекцию заданных траекторий.

Концепция корректирующего управления, ориентированная на повышение точности программных систем, была выдвинута в работах М.В.Игнатъева и Ю.В.Крементуло. Дальнейшее ее развитие связано с работами К.В.Лешника, Л.М.Боячука и И.В.Мирошника. Между тем целый ряд вопросов, относящихся к теории и практике построения многоканальных систем с корректирующим управлением и исследованию их динамических свойств, до сих пор оставался недостаточно изученным. Так, до настоящего времени были не исследованы устойчивость, точность и переходные процессы в таких системах. Основная трудность в изучении систем этого класса обусловлена структурной сложностью и тем обстоятельством, что в их замкнутые контуры входят параметры заданной траектории.

При реализации корректирующего управления движением сварочных автоматов и роботов возникает иная трудность, связанная с необходимостью текущего определения возможных отклонений линии свариваемого соединения от сварочного инструмента и геометрических параметров самого соединения от их номинальных значений. Одно из перспективных направлений в поисках решения этой проблемы основано на использовании так называемого электродугового метода, заключающегося в том, что указанные отклонения определяются косвенным путем по текущему изменению сварочного тока. Значительные результаты в данном направлении

приведены в работах В.А.Тимченко, Ф.Н.Кисилевского, Н.Р.Швидкого В.Т.Тертышного, В.В.Долиненко, В.Ф.Трефилова, В.М.Панарина, Y.Sugitani, V.Sensak и A.Yongyi. Однако до настоящего времени оставался нерешенной проблема, связанная с получением удовлетворительных оценок текущих величин упомянутых отклонений, поскольку сами оценки при изменении режимов и параметров процесса сварки также изменяются. Для получения оценок, слабо зависящих от изменения параметров, необходимо располагать, по возможности, более глубокими представлениями о функциональных связях между оценками и указанными параметрами.

Решение названных проблем, а также проблем, связанных с теорией и практикой построения широкого класса многоканальных систем с автоматической коррекцией программного движения, положено в основу диссертации.

Цель работы. Целью диссертационной работы являлось разработка и практическая реализация методов повышения точности систем управления программным движением сварочных автоматов и роботов путем корректирующего управления движением. При этом решались следующие задачи:

1. Аналитическое исследование динамики программных систем с корректирующим управлением, включающее анализ устойчивости, точности и времени переходных процессов;
2. Анализ влияния параметров сварочного контура, режима сварки, формы свариваемого соединения и характеристик поискового движения сварочного инструмента на оценку отклонения этого инструмента от линии соединения, получаемую путем наблюдения за изменением тока сварочной дуги;
3. На основе полученных теоретических результатов разработка высокоточных систем управления пространственным движением рабочих органов сварочных автоматов и роботов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовалась методология теории управления, методы пространства состояний, функции Ляпунова, рекуррентного оценивания и идентификации.

Научная новизна. Предложены методы повышения точности, основанные на совместном использовании принципов инвариантно-

сти, коррекции соотношений между динамическими ошибками ЛВС и коррекции скорости воспроизведения заданных траекторий. Разработаны структуры систем управления, реализующих указанные методы.

Получены уравнения динамики траекторной ошибки для систем управления программным движением с различными законами коррекции скорости, поворота вектора координатных ошибок и комбинированного корректирующего управления.

Определены робастные условия в виде алгебраических соотношения, гарантирующие асимптотическую устойчивость движения систем с корректирующим управлением.

Разработан аналитический метод оценивания точности в установленном режиме, основанный на развитии метода коэффициентов ошибок, предусматривающем построение процедуры рекуррентного оценивания, а также получены оценки точности и оценки времени выхода систем на номинальный режим.

Построена модель динамических процессов, протекающих в сварочном контуре при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа, и предложена квазитиперболическая модель линии поперечного сечения свободной поверхности сварочной ванны, формирующейся в процессе сварки углового соединения.

Впервые установлены зависимости, связывающие параметры сварочного контура, режима дуговой сварки, свариваемого соединения и текущее отклонение конца электрода от линии этого соединения с измеряемыми амплитудами старших гармоник колебаний сварочного тока.

Предложен принципиально новый метод оценивания изменений геометрических параметров свариваемого соединения, который основан на текущем измерении амплитуды второй гармоники сварочного тока, содержащей информацию об этих параметрах.

#### Практическая ценность и реализация результатов работы.

Разработанные методы и технические решения могут быть успешно использованы при создании широкого класса систем управления программным движением. Американское математическое общество и Мичиганский университет США сделали запрос по публикациям автора, в которых изложены упомянутые методы.

Установленные аналитические зависимости между параметрами сварочного процесса и отклонением сварочного инструмента от линии соединения, а также метод текущего оценивания изменений параметров этого соединения открывают новые возможности повышения качества формирования сварных швов, выполняемых сварочными автоматами и роботами, и расширения номенклатуры свариваемых изделий.

Предложены оригинальные технические решения систем с автоматической коррекцией программного движения, защищенные авторскими свидетельствами и обеспечивающие значительное повышение точности воспроизведения заданных траекторий.

Полученные теоретические и практические результаты использованы при выполнении хозяйственных и госбюджетных работ, которые были проведены в период с 1987 по 1995 год под руководством и при непосредственном участии автора.

Методы текущей коррекции траектории движения сварочного инструмента были реализованы в рамках темы I.6.I.2I.IO, выполняемой по постановлению Бюро ОФТП НАН Украины, и использованы в разработке системы геометрической адаптации РТК ДС для НПО "Ритм" (г. Санкт-Петербург, хозяйственный договор N 77IO).

Метод коррекции соотношений между динамическими ошибками воспроизводящих систем использован при разработке 4-х систем текущей адаптации роботов РМ ОI для НПО "НИИПТмаш" (г. Краматорск, хозяйственные N I7 и N 227).

Методы оценки бокового и продольного текущих отклонений сварочного инструмента от линии свариваемого соединения, основанные на использовании сварочной дуги в качестве источника информации, а также соответствующие алгоритмы и программы были реализованы при выполнении проектов 6.4.3.3 и 6.I2.2, разрабатываемых в рамках Государственных научно-технических программ 5.54 "Сверка и смежные вопросы" и 6.4 "Способы создания компьютерных интегрированных производств", утвержденных ГКНТ. Эти методы нашли применение в разработках всех 5-ти указанных систем (хозяйственные N 77IO, N I7 и N 227).

Методы текущей оценки отклонений сварочного инструмента, инвариантные по отношению к изменению режима дуговой сварки, реализованы при выполнении НИР, проводимой ИЭС им. Е.О. Патова

по Торговому договору с фирмами Nokia и Aitek (Финляндия). После завершения данной разработки предполагается создание промышленной версии системы слежения за сварочным швом.

Акты внедрения приведены в Приложении к диссертации.

На защиту выносятся следующие основные положения, разработанные лично автором:

1. Методы повышения точности движения по траекториям, основанные на сжатии и повороте вектора координатных ошибок, а также структуры систем, реализующие указанные методы.

2. Динамические модели траекторной ошибки традиционных систем и систем с корректирующим управлением.

3. Результаты аналитического исследования динамических свойств систем, включающие:

- алгебраические условия робастной устойчивости движения систем произвольного порядка по криволинейным траекториям с различными законами коррекции этого движения;

- робастные условия устойчивости движения систем низкого порядка с коррекцией скорости, с поворотом вектора координатных ошибок и комбинированным корректирующим управлением;

- условия устойчивости движения, полученные на основе функции Ляпунова;

- оценки точности движения по заданным траекториям в установленном режиме и оценки времени переходных процессов, а также методы их получения.

4. Математические модели динамических процессов, протекающих в сварочном контуре при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа, и модель огибающей линии поперечного сечения свободной поверхности сварочной ванны, формирующейся в ходе дуговой сварки углового соединения при поперечных колебаниях дуги.

5. Аналитические зависимости, связывающие измеряемые амплитуды старших гармоник колебания сварочного тока и их фазовые сдвиги с физическими и геометрическими параметрами, характеризующими сварочный процесс, свариваемое соединение, поперечное движение горелки и текущее пространственное положение конца электрода относительно линии данного соединения.

6. Метод оценивания изменений геометрических параметров

свариваемого соединения, основанный на идентификации амплитуды второй гармоники сварочного тока при поперечных колебаниях дуги относительно линии этого соединения.

7. Технические решения (защищенные авторскими свидетельствами), позволяющие реализовать автоматическую коррекцию скорости воспроизведения программно заданных траекторий, автоматический поворот вектора координатных ошибок, комбинированную автоматическую коррекцию, боковую и продольную коррекцию сварочной горелки.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на 5-м и 7-м Всесоюзных совещаниях по теории инвариантности (Киев, 1978 и Баку, 1987), 4-м и 6-м Всесоюзном совещании по управлению многосвязными системами (Москва, 1978 и Суздаль, 1990), 8-м Симпозиуме по проблемам избыточности в информационных системах (Ленинград, 1983), 6-м Региональном научно-техническом семинаре по многопроцессорным вычислительным системам (Таганрог, 1985), Всесоюзном семинаре по динамике нелинейных процессов управления (Таллинн, 1987), II-м Всесоюзном совещании по проблемам управления (Ташкент, 1989), 5-м Всесоюзном совещании по робототехническим системам (Геленджик, 1990), I-ой Всесоюзной конференции по координирующему управлению в технических и природных системах (Малый Маяк, 1991), конференции по роботизации производства сварных конструкций (Киев, 1990), семинаре по автоматизации методов неразрушающего контроля качества (Славское, 1992).

Работа в целом докладывалась на научном семинаре "Автоматика, источники нагрева и питания, физика дуговых процессов, неразрушающий контроль" в Институте электросварки им. Е.О.Патона НАНУ .

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 37 печатных работ, в числе которых семь авторских свидетельств и один патент на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 300 стр., в том числе 45 стр. иллюстраций и

таблиц, список литературы на 17 стр. (151 наименование) и 7 стр. приложений.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу и классификации методов повышения точности широкого класса многоканальных систем с корректирующим управлением программно заданного движения. Особенность этих систем заключается в том, что их желаемые движения в геометрическом пространстве  $\mathbb{R}^m$  задаются с точностью до линий

$$F_u(x^0) = 0, \quad u = 1, \dots, m-1, \quad (1)$$

являющихся траекториями движения, где  $x^0(t) = [x_1^0(t), \dots, x_m^0(t)]^T$ .

В качестве меры точности воспроизведения заданных траекторий в системах рассматриваемого класса выступает так называемая траекторная (контурная) ошибка

$$\varepsilon(t) = \|x(t) - x^M(t)\|,$$

характеризующая расстояние от точки фактического положения рабочего инструмента системы с текущими координатами  $x_1(t), \dots, x_m(t)$ , до ближайшей точки

$$x^M(t) = \arg \min_{\bar{x} : F_u(\bar{x})=0} \|x(t) - \bar{x}\|,$$

находящейся на воспроизводимой траектории (1), где  $x^M(t) = [x_1^M(t), \dots, x_m^M(t)]^T$ ,  $x(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^T$ ,  $\bar{x} = [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m]^T$ .

Задача корректирующего управления заключается в обеспечении движения точки  $x(t)$  внутри так называемой гипертрубки динамической точности, радиус  $\varepsilon_0$  которой характеризует задаваемую точность движения, т.е. задача состоит в выполнении условия

$$|\varepsilon(t)| \leq \varepsilon_0 \quad (2)$$

при всех  $t > t_0$ .

Оценка траекторной ошибки  $\varepsilon(t)$  задается в виде

$$\hat{\varepsilon} = \|\delta x\| \sin \varphi, \quad (3)$$

где

$$\|\delta x\| = \sqrt{\delta x_1^2 + \delta x_2^2 + \dots + \delta x_m^2}$$

- евклидова норма вектора координатных ошибок,

$$\varphi = \arccos \frac{\delta x \cdot \dot{x}^0}{\|\delta x\| \|\dot{x}^0\|}$$

- угол между вектором  $\delta x$  и вектором  $\dot{x}^0 = [\dot{x}_1^0, \dots, \dot{x}_m^0]^T$ , направленным вдоль касательной к воспроизводимой траектории.

Анализ выражения (3) показывает, что для уменьшения траекторной ошибки есть по крайней мере три принципиально различных пути. Первый путь основан на уменьшении нормы  $\|\delta x\|$  вектора координатных ошибок  $\delta x$  или, иначе говоря, на "снятии" вектора  $\delta x$ . Этот путь может быть реализован либо за счет непосредственного уменьшения ошибок ЛВС, т.е. традиционно, либо за счет корректирующего управления скоростью воспроизведения  $V(t) = \dot{x}^0(t)$  в функции от траекторной ошибки  $\varepsilon$ , предложенного в свое время М.Б.Игнатьевым. Второй путь связан с уменьшением угла  $\varphi$ . Реализация этого пути возможна или за счет введения в ЛВС дополнительных связей, обеспечивающих подачу корректирующих сигналов, направленных на поворот вектора  $\delta x$  вокруг точки  $x^0(t)$ , или за счет введения в систему дополнительных ЛВС, выполняющих этот же поворот. Третий путь предполагает корректирующее "смещение"  $\delta x$ , в результате которого начало данного вектора должно скользить по заданной траектории  $F_u(x^0) = 0$  или хотя бы находиться в пределах гипертрубки динамической точности.

Сравнительный анализ существующих методов повышения точности показывает, что ни один из них сам по себе в отдельности не может, в частности, обеспечить одинаково высокую точность на всей траектории, если ее кривизна переменна. В связи с этим предлагаются методы, основанные на совместном воздействии и на модуль вектора  $\delta x$ , и на угол  $\varphi$ , позволяющие обеспечить как высокую точность, так и стабилизацию контурной

ошибки. Предлагается, соответственно, и несколько вариантов структур систем, гарантирующих наиболее высокие показатели точности. Одна из таких структур приведена на рис. 1, на котором обозначены:  $W_R = W_R(p)$ ,  $W_o = W_o(p)$  - передаточные функции регулятора и объекта;  $q^o$ ,  $q$  - векторы входных и выходных воздействий ЛВС;  $\delta q = q_o - q$  - вектор ошибок ЛВС;  $A^{-1}(\cdot)$  - вектор-функция, определяемая кинематикой конкретной системы и реализуемая в программирующем устройстве ПУ;  $V_o$ ,  $\epsilon_o$  - расчетные значения скорости и точности, вводимые в корректирующее устройство КУ.

Предложенный нетрадиционный подход к повышению точности, направленный на сжатие вектора  $\delta x$  путем корректирующего управления скоростью  $V$ , а также на поворот и смещение данного вектора, связан с введением в структуры систем корректирующих обратных связей (см. рис. 1). Это, естественно, может

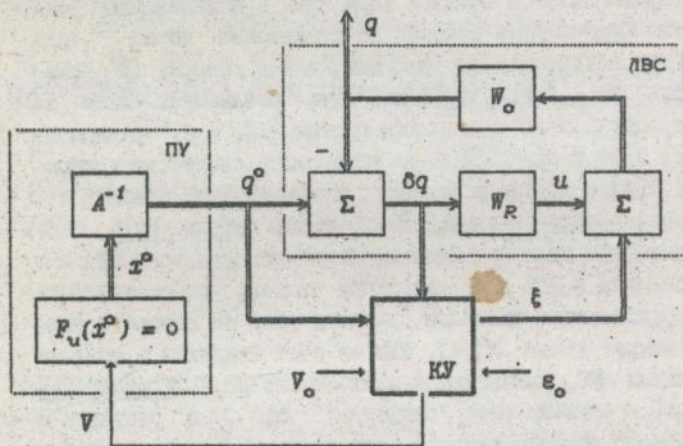


Рис. 1

привести к нарушению устойчивости движения. Появляется, таким образом, острая необходимость в оценке области возможных значений параметров корректирующих устройств, в которой гарантируется асимптотическая устойчивость движения системы. Задача представляется достаточно сложной. Трудности в получении та-

ких оценок на основе известных критериев теории устойчивости связаны с тем обстоятельством, что в отличие от обычных систем управления программным движением здесь в замкнутый контур могут входить параметры самой траектории  $F_u(x^0) = 0$ .

Во второй главе проведено исследование устойчивости движения систем с корректирующим управлением. Впервые в явном виде получена динамическая модель траекторной ошибки:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\varepsilon}}_n &= A_n \hat{\varepsilon}_n + \mu b_2 (xV^2) + \dots + \mu b_n (xV^2)^{(n-2)} - \mu L_2 c \xi, \\ \varepsilon &= d \hat{\varepsilon}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $\hat{\varepsilon}_n = [\hat{\varepsilon}_{n1}, \dots, \hat{\varepsilon}_{nn}]^T$ ,  $\hat{\varepsilon}_{ni} = \varepsilon_n^{(i-1)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $A_n$  —  $(n \times n)$ -матрица параметров ЛВС  $\alpha_{n-i}$ , представленная в форме Фробениуса;  $L_2$  — матрица, определяемая из выражения

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1(s) & \dot{X}_2(s) \\ \dot{X}_2(s) & -\dot{X}_1(s) \end{bmatrix},$$

в котором  $\dot{X}_1(s)$ ,  $\dot{X}_2(s)$  — производные по параметру  $s(t) = \int V(t) dt$  известных функции  $X_1(s)$  и  $X_2(s)$ , задаваемых многообразием (I);  $b_i$ ,  $c$  и  $d$  — векторы вида  $b_i = [0, \dots, 0, \frac{\alpha_{n-i}}{\alpha_0}]^T$ ,  $c = [0, \dots, 0, \frac{\alpha_n}{\alpha_0}]^T$ ,  $d = [1, 0, \dots, 0]$ ;

$V(t)$  и  $\xi(t)$  — корректирующие сигналы;

$$\kappa = \kappa(s) = |\dot{X}_1(s) \dot{X}_2''(s) - \dot{X}_1''(s) \dot{X}_2(s)|$$

— кривизна многообразия (траектории) (I) в точке  $x_0$ ;

$$\mu = 1 + \frac{\alpha_{n-1}^2}{2\alpha_0 \alpha_n}$$

— безразмерный параметр, характеризующий демпфирующие свойст-

ва ЛВС;  $\varepsilon_n$  - уточненная оценка траекторной ошибки  $\varepsilon$ , определяемая из соотношения  $\varepsilon_n = \hat{\mu}\varepsilon$ . (Штрихами здесь и далее обозначено дифференцирование по соответствующему параметру, а  $(*)^{(\prime\prime)} = d^{(\prime\prime)}(*)/dt^{(\prime\prime)}$ ).

Законы корректирующего управления строятся в форме

$$[V(t)]^2 = \Omega(\phi(t)), \quad (5)$$

$$\xi(t) = -L_2^{-1}U(\phi(t)), \quad (6)$$

где  $\Omega(\cdot)$  и  $U(\cdot)$  - некоторые линейные операторы, а

$$\phi(t) = \varepsilon_0 - \varepsilon_n(t). \quad (7)$$

Модели, описывающие динамику замкнутых систем управления программным движением с автоматической коррекцией скорости  $V$ , с поворотом вектора  $\delta x$  и с комбинированной коррекцией, в силу (4)-(7) для случая, когда операторы  $\Omega(\cdot)$ ,  $U(\cdot)$  задаются в форме ПИД-структуры, получены соответственно в виде

$$\dot{\phi}_n = [\hat{A}_n + \mu g \hat{H}_{nn}] \phi_n, \quad (8)$$

$$\dot{\phi}_n = [\hat{A}_n + \mu c \hat{K}_n] \phi_n - \mu g' b_2 V^3, \quad (9)$$

$$\dot{\phi}_n = [\hat{A}_n + \mu g \hat{H}_{nn} + \mu c \hat{K}_n] \phi_n, \quad (10)$$

$$\dot{\psi} = c \phi_n.$$

Здесь  $\phi_n = [\phi_{n1}, \dots, \phi_{nn}]^T$ ,  $\phi_{ni} = \phi^{(i-1)}$ ;  $\hat{A}_n$ ,  $\hat{H}_{nn}$ ,  $\hat{K}_n$  -  $(n+1) \times (n+1)$ - расширенные матрицы параметров, а  $g' = g'(s)$ .

При этом

$$\hat{A}_n = \left[ \begin{array}{c|ccc} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & A_n & & \end{array} \right], \quad \hat{K}_n = \left[ \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ K_n'' & K_n'' & K_n'' & \dots & 0 \end{array} \right].$$

$$H_{nn} = \begin{bmatrix} w_1 & w_3 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & \dots & 0 \\ 0 & w_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & w_{n+1} \end{bmatrix}$$

где  $w_i = (K_D \alpha_{i-1} + K_{\Pi} \alpha_{i-2} + K_{\Pi} \alpha_{i-3}) \frac{1}{\alpha_0}$ ,  $i=1, \dots, n-1$ ,  $w_n = (K_{\Pi} \alpha_{n-2} + K_{\Pi} \alpha_{n-3}) \frac{1}{\alpha_0}$ ,  $w_{n+1} = K_{\Pi} \frac{\alpha_{n-2}}{\alpha_0}$ , а  $K_{\Pi}$ ,  $K_{\Pi}$ ,  $K_D$  и  $K_{\Pi}^*$ ,  $K_{\Pi}^*$ ,  $K_D^*$  - соответственно, параметры настройки контуров коррекции скорости  $V$  и поворота вектора  $\delta x$ .

Устойчивость движения систем, описываемых моделями (8) - (10) при условии, что параметр  $\varepsilon = \varepsilon(s)$  постоянен или темп его изменения значительно меньше темпа переходных процессов в системе, т.е. в квазистационарном случае, определяется, очевидно, характеристическими числами матриц  $[\hat{A}_n + \mu \varepsilon \hat{H}_{nn}]$ ,  $[\hat{A}_n + \mu \varepsilon \hat{K}_n]$  и  $[\hat{A}_n + \mu \varepsilon \hat{H}_{nn} + \mu \varepsilon \hat{K}_n]$ . Однако, если требуется не только обеспечить устойчивость движения системы относительно заданного многообразия при фиксированных значениях параметра  $\varepsilon$ , но и оценить область возможных значений этого параметра, при которых движение системы остается робастно устойчивым, то возникают трудности, связанные с очень громоздкими вычислительными процедурами, объем которых быстро возрастает по мере роста порядка системы.

Задача состоит в том, чтобы получить интересующую нас оценку возможных значений  $\varepsilon$ , построение которой не требовало бы трудоемких вычислительных операций. Подобного рода задачам уделено в последнее время значительное внимание. Одна из таких задач встречалась в работах М.Пароди и А.В.Липатова, Н.И.Соколова. Между тем использование сравнительно простых достаточных условий для определения граничных значений варьируемого параметра, полученных упомянутыми авторами, приводит, как оказалось, к заметным неудобствам, обусловленным необходимостью решения систем квадратичных неравенств либо обращения матриц.

В диссертации получен ряд новых результатов, сформулированных и доказанных в виде соответствующих утверждений, которые позволяют оценить граничные значения  $g$  непосредственно в аналитической форме, не прибегая к сложным вычислительным процедурам. В частности, показано, что если движение локальных воспроизводящих систем асимптотически устойчиво и выполняется условие

$$g < \inf_{\xi} \frac{1}{\mu} \left[ 1 + \frac{R_{\xi}}{\Delta_{\xi}^{\circ}} \right]^{-1} . \quad (II)$$

в котором

$$R_{\xi} = \sup_{\nu} \left| \sum_{j=1}^{m_{\nu}} \Delta_{\xi j}(\nu) \right| , \quad m_{\nu} = \frac{\xi}{|\xi - \nu|} , \quad \nu = 1, \dots, \ell ,$$

то движение замкнутой системы (8) также асимптотически устойчиво. В выражении (II)  $\Delta_{\xi}^{\circ}$  -  $\xi$ -я главный диагональный минор матрицы Гурвица  $\hat{H}_{\xi}^{\circ}$ , образованной из коэффициентов полинома, соответствующего дифференциальному уравнению (8) при  $g = 0$ ;  $\Delta_{\xi j}(\nu)$  - минор, полученный замещением  $\nu$  столбцов минора  $\Delta_{\xi}^{\circ}$  соответствующими столбцами минора  $\Delta_{\xi}^{**}$  матрицы  $\hat{H}_{**}$ .

Получены также условия робастной устойчивости движения систем произвольного порядка с пропорционально-дифференциальным, пропорционально-интегральным и интегральным законами коррекции, сформулированные и доказанные в форме определенных утверждений.

Для большинства практических случаев, когда ЛВС описываются уравнениями низкого порядка, оказалось возможным получение условий устойчивости, не налагающих ограничений на величину  $g$ . В частности, показано, что для систем третьего порядка, т.е. когда  $n = 2$ , движение замкнутых систем (8) и (9) асимптотически устойчиво при любых значениях  $g$ , если выполняются условия

$$K_{11} < \frac{K_{11} a_1 + K_{12} a_2}{a_0} . \quad (I2)$$

$$K_n^* < (1 + \mu K_n^*) \frac{a_1 + \mu K_n^* a_2}{a_0} \quad (13)$$

соответственно.

Получены условия, гарантирующие асимптотическую устойчивость движения при любых значениях  $\varepsilon$  для систем, описываемых уравнением (10) при  $n = 2$ , и для систем с законами корректирующего управления, отличными от (5) и (6). В частности, на основе прямого метода Ляпунова проведено исследование устойчивости движения системы с интегральным законом коррекции скорости  $V$ . При этом получено условие

$$\varepsilon < \frac{a_1 a_2}{2\mu V a_0^2 K_n} \quad (14)$$

устанавливающее ограничение на кривизну  $\varepsilon$  при заданной скорости движения  $V$ .

Третья глава посвящена вопросам анализа переходных и установившихся режимов в системах управления программным движением с автоматической коррекцией скорости и поворотом вектора координатных ошибок. Трудности, возникающие при оценивании точности таких систем в установившемся режиме на основе известного метода коэффициентов ошибок, связаны здесь с появлением зависимости сигналов, поступающих на входы локальных воспроизводящих систем, от ошибок самих этих систем.

Для преодоления указанных трудностей предлагается подход, основанный на построении процедур рекуррентного оценивания траекторной ошибки  $\varepsilon$  с использованием метода коэффициентов ошибок.

Получен ряд оценок точности воспроизведения заданных многообразий в установившемся режиме без каких-либо ограничений на порядок дифференциальных уравнений, описывающих эти системы. В частности, для случая, когда  $\xi = 0$ , а закон формирования скорости воспроизведения (5), (7) выбирается в форме

$$V^2 = K_n (\varepsilon_0 - \varepsilon_n) .$$

получено следующее выражение для оценки установившейся траекторной ошибки

ЛНБ им. В. Стефанько  
АН Украины

$$\varepsilon_{\infty} = N_0 \varepsilon(s) + N_1 \varepsilon'(s) + N_2 \varepsilon''(s) + \dots \quad (15)$$

В этом выражении

$$N_i = C_i \left[ \frac{K_{\Pi} \varepsilon_0}{\alpha} \right]^{\frac{i+2}{2}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

где  $C_i$  - коэффициенты ошибок, определяемые из уравнения (8) при  $\varepsilon = 0$ , а безразмерный параметр  $\alpha$  равен

$$\alpha = 1 + \varepsilon K_{\Pi} C_0. \quad (16)$$

Показано, что введение в систему обратной связи, обеспечивающая автоматическую коррекцию скорости  $V$  в функции от траекторной ошибки  $\varepsilon_n$ , когда заведомо выполняется условие устойчивости (II), приводит к уменьшению установившейся ошибки  $\varepsilon_{\infty}$ . При этом составляющая ошибки, вызванная кривизной траектории, уменьшается в  $\alpha$  раз, а составляющая, связанная с изменением кривизны траектории - в  $\sqrt{\alpha^3}$  раз.

Если закон управления скоростью строится в форме

$$V^2 = K_{\Pi} \int_0^t [\varepsilon_0 - \varepsilon_n(t)] dt,$$

то оценка траекторной ошибки при  $\xi = 0$  представляется в виде следующего ряда:

$$\varepsilon_{\infty} = \varepsilon_0 + C_1 \varepsilon'(s) \left( \frac{\varepsilon_0}{C_0 \varepsilon} \right)^{\frac{3}{2}} + C_2 \varepsilon''(s) \left( \frac{\varepsilon_0}{C_0 \varepsilon} \right)^2 + \dots \quad (17)$$

Получена также оценка точности воспроизведения траекторий системами с автоматическим поворотом вектора координатных ошибок  $\delta x$  для случая, когда  $V = \text{const}$ , а оператор  $U(\cdot)$

в выражении (6) выбирается в виде  $U(t) = K_{\Pi} \int_0^t [\varepsilon_0 - \varepsilon_n(t)] dt$ .

Эта оценка определяется следующим выражением:

$$\varepsilon_{\infty} = \varepsilon_0 + \mu V^2 [C_1 V \varepsilon'(s) + C_2 V^2 \varepsilon''(s) + \dots] \quad (18)$$

При исследовании переходных режимов в системах с автоматической коррекцией скорости  $V$  показано, что время выхода

этих систем на номинальный режим уменьшается в  $K$  раз по сравнению со временем выхода систем на тот же режим без коррекции, где

$$K = \left[ 1 + \mu_{\text{ЭК}} \frac{a_{n-2}}{a_n} \right]^{1/n}. \quad (19)$$

Показано также, что при  $\Omega = U$  и  $\alpha = 0$  время выхода на номинальный режим систем с поворотом вектора  $\delta x$  составляет величину, в  $K''$  раз меньшую, чем время выхода систем с коррекцией скорости  $V$  на такой же режим, где

$$K'' = \left[ \frac{a_n}{\mu a_{n-2}} \right]^{1/(n+1)}. \quad (20)$$

Приведены результаты моделирования на ЭВМ, показывающие, что предложенный подход к анализу установившихся и переходных режимов позволяет получить достаточно точные представления об этих режимах.

В четвертой главе построены аналитические модели динамических процессов, протекающих в сварочном контуре при дуговой сварке угловых соединений плавящимся электродом. В отличие от моделей, используемых в работах В.М.Панарина, В.В.Долиненко, А.Yongyi, Y.Li, M.Ushio, W.Mao, Y.Sugitani, A.Koves, эти модели учитывают не только параметры указанных процессов, но и геометрические свойства свариваемых соединений. Получена, в частности, динамическая модель

$$R_{\text{св}} \delta i + EM \delta i = E \phi, \quad (21)$$

$$\phi = F'(x) [V_x + \xi N] + F''(x) \left[ \xi V_x + \frac{\xi^2}{2} N \right],$$

в которой  $\delta i = i(t) - i_0$  - отклонение текущего значения сварочного тока  $i(t)$  в точке  $P$  (см. рис. 2) от его номинального значения  $i_0$  в точке  $P_0$ ;  $F(x)$  - линия сварки, являющаяся линией пересечения некоторой поверхности и плоскости  $XZ$ ;  $V_x$  - скорость перемещения горелки вдоль оси  $X$ ;  $E$  - напряженность электрического поля в столбе дуги;  $N = \left. \frac{\partial V_{\text{пл}}}{\partial i} \right|_{i_0}$

крутизна скоростной характеристики плавления электрода по

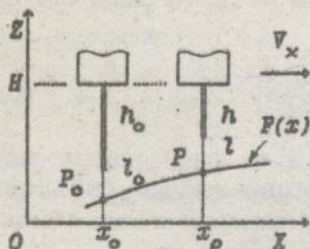


Рис. 2

току в точке  $P_0$ :  $N = \frac{\partial V_{пл}}{\partial h} \Big|_{h_0}$

крутизна скоростной характеристики плавления электрода по вылету в этой же точке, где  $V_{пл}$  - скорость плавления электрода,  $h = h(t)$ ,  $h_0$  - соответственно текущее и начальное значения вылета электрода;  $\xi = [x_p(t) - x_0]$  - текущее отклонение продольной оси вылета электрода от началь-

ного своего положения;

$$R_{св} = R + r h_0 + S_A - S_{\pi} + NL$$

- суммарное сопротивление сварочной цепи, где  $L$ ,  $R$  - индуктивность и активное сопротивление сварочного контура,  $r = \frac{4\rho}{\pi d}$  - коэффициент, характеризующий электрическое сопротивление вылета электрода, приходящееся на единицу его длины, а  $\rho$ ,  $d$  - удельное сопротивление и диаметр электрода соответственно;

$S_A = \frac{\partial u_A}{\partial t} \Big|_{t_0}$ ,  $S_{\pi} = \frac{\partial u_{\pi}}{\partial t} \Big|_{t_0}$  - крутизна

вольт-амперных характеристик дуги и источника питания соответственно, а  $u_{\pi} = u_{\pi}(t)$  - напряжение источника питания, зависящее в общем случае от тока сварки  $i$ ,  $u_A = u_A(i, l)$  - напряжение на дуге, являющееся функцией тока сварки  $i$  и длины дугового промежутка  $l$ .

В рамках этой модели исследован процесс

$$\begin{aligned} \delta t(t) = & \frac{KV_x}{M} (1 - NT_{св}) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_N}{T_{св}}\right) \right] + \\ & + \frac{KV_x}{M} N(t-t_N), \quad T_{св} = \frac{R_{св}}{EM}, \end{aligned} \quad (22)$$

который возникает в сварочном контуре при дуговой сварке, когда линия  $P(x)$  представляет собой прямую, расположенную под некоторым углом к "горизонтальной" линии  $z = H$  (см. рис. 3).

Показано, что в начальный период времени (от  $t_n = \frac{x_n}{V_x}$  до  $t_n = t_n + [1 - NT_{св}] N^{-1}$  (рис. 4)) основной "вклад" в возникающее отклонение  $\delta i$  вносит та его часть, которая вызвана скачкообразным изменением скорости движения электрода  $\Delta V_{св} = KV_N$  относительно текущей точки сварки  $P$ . Этот вклад тем боль-

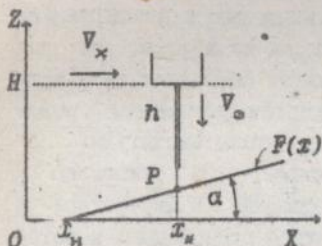


Рис. 3

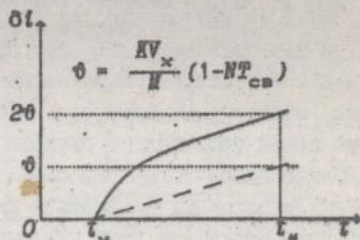


Рис. 4

ше, чем больше угол наклона линии сварки  $\alpha = \text{arctg } K$  и скорость перемещения горелки  $V_x$ . В момент времени  $t = t_n$  отклонение  $\delta i$  определяется в равной степени как "дополнительной" скоростью  $\Delta V_{св}$ , так и уменьшающимся расстоянием  $H_c = H - F(x)$  между торцом горелки и точкой сварки  $P$ . Иначе говоря, при  $t = t_n$  вклад первого и второго факторов практически одинаков. При  $t > t_n$  "доля" в отклонении  $\delta i$ , вносимая уменьшающимся расстоянием  $H_c$  (второе слагаемое в выражении (22)), становится преобладающей.

Исследован также случай, когда продольная ось вылета электрода совершает в процессе сварки в плоскости  $XZ$  (см. рис. 3) заданные периодические колебания  $x = x_n + A \sin(\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f$ , относительно некоторой фиксированной точки  $x_n$  с амплитудой  $A$  и частотой  $f$ . Линия же  $P(x) = Kt$  по-прежнему расположена под некоторым углом  $\alpha = \text{arctg } K$  к оси  $X$ . Показано, что амплитуда  $A$  колебания сварочного тока при  $A < (x_n - x_n)$  будет определяться соотношением

$$A = \frac{KAB}{R_{св}} \frac{\omega T_{св}}{\sqrt{1 + (\omega T_{св})^2}} \quad (23)$$

Анализ выражения (23) показывает, что по мере увеличения частоты  $f$  амплитуда  $\Delta$  асимптотически приближается к максимальному своему значению

$$\Delta_n = \frac{KAE}{R_{св}} \quad (24)$$

совершенно независимому от  $f$ .

Из (24) видно, что  $\Delta_n$  не зависит также и от параметра  $M$ , а это означает, что  $\Delta_n$  практически не зависит от режима дуговой сварки. Полученный результат позволяет, в частности, ответить на вопрос: с какой частотой поперечных колебаний нужно производить дуговую сварку, чтобы амплитуда  $\Delta$  колебаний сварочного тока была инвариантной по отношению к изменению основных параметров режима сварки? В литературе в последнее время все чаще стали появляться публикации, в которых по данному вопросу высказываются самые противоречивые суждения. Показано, что частоту колебания горелки  $f$  следует выбирать из условия

$$f > \frac{1}{2\pi T_{св}} \left[ \frac{1}{(1-\mu)^2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (25)$$

в котором  $\mu$  - малое положительное число, характеризующее наперед задаваемую степень инвариантности  $\Delta$  по отношению к  $M$ .

На основе идентификационных экспериментов построена квазитгиперболическая модель огибающей линии сечения поверхности сварочной ванны плоскостью, в которой производятся поперечные колебания дуги при сварке углового соединения плавящимся электродом. Эта модель имеет вид

$$F(x) = A\sqrt{K} \ln \left[ 2 \operatorname{ch} \left( \sqrt{\frac{K}{\Lambda}} x \right) \right] \quad (26)$$

В формуле (26)  $K = \operatorname{tg} \alpha$  - угловой коэффициент асимптот кривой  $F(x)$  (см. рис. 5), а через  $\Lambda$  обозначено выражение

$$\Lambda = \left[ \frac{3\pi\alpha^2 V_0}{\pi V_{св}} + \frac{3b}{\kappa} (Kb - 4c) \right]^{1/2} \quad (27)$$

раскрывающее аналитическую зависимость геометрической формы

линии  $P(x)$  от скорости сварки  $V_{св}$ , скорости подачи  $V_0$  и диаметра  $d$  электродной проволоки, ширины зазора  $b$  между кромками, глубины притупления кромки  $c$  и угла  $\alpha = \text{arctg } K$ , характеризующего угол разделки кромок. Коэффициент  $m$  в (27) определяет отношение площади поперечного сечения сварочной ванны непосредственно под вылетом электрода к площади поперечного сечения углового соединения, окончательно заполненного металлом в результате дуговой сварки.

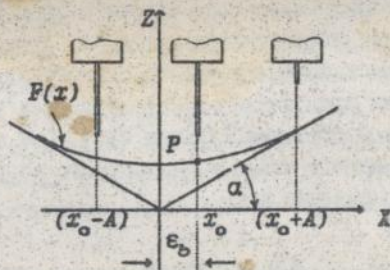


Рис. 5

На основе разработанных моделей (21), (28) впервые установлены соотношения

$$\Delta_1 = \frac{AKE \operatorname{th} \left( \frac{\sqrt{K}}{\Lambda} \epsilon_b \right)}{R_{св} \sqrt{1 + (\omega T_{св})^{-2}}}, \quad (28)$$

$$\Delta_2 = \frac{A^2 \sqrt{K^3} E}{4\Lambda R_{св} \operatorname{ch}^2 \left( \frac{\sqrt{K}}{\Lambda} \epsilon_b \right) \sqrt{1 + (2\omega T_{св})^{-2}}}, \quad (29)$$

аналитически связывающие измеряемые значения амплитуд  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  первой и второй гармоник колебаний сварочного тока

$$\delta i(t) = \Delta_0 + \Delta_1 \cos(\omega t + \beta) + \Delta_2 \sin(2\omega t + \gamma) \quad (30)$$

со значениями параметров, характеризующих сварочный контур ( $E$ ,  $T_{св}$ ,  $R_{св}$ ), режим дуговой сварки ( $T_{св}$ ,  $\Lambda$ ), форму се-

чения свариваемого соединения ( $K$ ,  $\Lambda$ ), поперечное движение горелки ( $A$ ,  $\omega$ ) и "боковое" отклонение конца электрода относительно линии соединения свариваемых элементов ( $\epsilon_b$ ). В выражении (30)  $\Lambda_0$  - постоянная составляющая, а  $\beta = -\arctg(\omega T_{CB}) - \arctg(\frac{N}{\omega})$ ,  $\gamma = -\arctg(2\omega T_{CB}) - \arctg(\frac{N}{2\omega})$ .

В пятой главе рассматриваются задачи синтеза систем автоматической коррекции движения сварочного инструмента с использованием электродугового сенсора в цепи глобальной обратной связи. Дана классификация и сделан сравнительный анализ известных методов оценки бокового отклонения  $\epsilon_b$ . Задача текущей коррекции отклонения  $\epsilon_b$  решается как задача автоматического поиска экстремума функции (28). При этом в качестве метода поиска принят метод модулирующего воздействия, а синхронное детектирование вида

$$u_1 = \frac{rA}{T} \int_{t-T}^t \delta t(t) \sin(\omega t + \varphi) dt \quad (31)$$

используется как способ выделения сигнала  $u_1 = u_1(\Delta_1)$ , отображающего, согласно (28), (30), величину текущего отклонения  $\epsilon_b$ . В выражении (31)  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ,  $r$  - коэффициент пропорциональности, а  $\varphi$  - настраиваемая начальная фаза.

На основе процедур идентификации некоторого обобщенного параметра

$$B_1 = \frac{rA^2 KE}{2R_{CB} \sqrt{1 + (\omega T_{CB})^2}} \sin(\varphi + \beta) \quad (32)$$

и автоматической настройки параметра  $K_b$  системы боковой коррекции из условия

$$K_b B_1 \sqrt{\frac{K}{\Lambda}} = \text{const} \quad (33)$$

решается задача обеспечения инвариантности (по отношению к изменяющимся условиям и режимам дуговой сварки) времени выхода инструмента на линию свариваемого соединения, определяемого

при  $\sqrt{\frac{K}{\Lambda}} = \text{const}$  уравнением

$$\dot{\varepsilon}_b(t) = -K_b B_1 \operatorname{th} \left[ \sqrt{\frac{K}{\Lambda}} \varepsilon_b(t) \right].$$

Поставлена и решена задача продольной коррекции сварочного инструмента, отличительной особенностью которой является то, что стабилизация расстояния  $H_c = H - P(x)$  от торца горелки до поверхности свариваемого изделия (см. рис.2) выполняется в условиях поперечных колебаний дуги и боковой коррекции сварочного инструмента.

Наряду с задачами пространственной коррекции решается задача так называемой технологической адаптации, т.е. коррекции параметров режима сварки, обеспечивающей заполнение металлом углового соединения на заданном уровне, независимо от изменения самих параметров этого соединения. Предложен принципиально новый метод оценки изменения геометрических параметров свариваемого соединения, основанный на измерении амплитуды  $\Delta_2$ .

Из (29) и (27) видно, что при  $\varepsilon_b = 0$  и фиксированных значениях  $\Lambda$ ,  $E$ ,  $R_{св}$ ,  $T_{св}$ ,  $\omega$ ,  $V_{св}$  и  $V_a$  амплитуда  $\Delta_2$  зависит только от параметров  $K$ ,  $b$  и  $c$ , характеризующих угол разделки кромок, ширину зазора между кромками и притупление кромки. Следовательно, наблюдение за изменением  $\Delta_2$ , которое доступно в любой момент времени  $t$ , может быть в принципе использовано для оценивания неконтролируемых изменений параметров  $K$ ,  $b$  и  $c$  непосредственно в процессе сварки. Задача поддержания заданного уровня заполнения металлом свариваемого соединения сводится, таким образом, к задаче стабилизации  $\Delta_2$  путем корректирующего воздействия, например, на скорость сварки  $V_{св}$ , входящую в формулу (27). При этом предполагается выполнение условия  $V_{св} \in Q_v$ , где  $Q_v$  - допустимое множество значений параметра  $V_{св}$ .

В шестой главе рассмотрены вопросы технической реализации и практического применения систем с автоматической коррекцией движения исполнительных механизмов и проведены экспериментальные исследования этих систем. Для выполнения исследований был создан на базе промышленного робота RM 01 и сварочного оборудования фирмы Kemppi роботизированный технологи-

ческий комплекс для дуговой сварки.

Результаты экспериментальных исследований показали следующее:

- введение в систему обратных связей, обеспечивающих поворот вектора координатных ошибок и автоматическую коррекцию скорости воспроизведения траектории приводит при соблюдении условий устойчивости (12)-(14) к увеличению в 8-8 раз точности воспроизведения и к уменьшению в 3-5 раз времени протекания переходных процессов, что вполне согласуется с полученными в третьей главе оценками (18), (19) и (20);

- введение в систему кинематической избыточности, направленной на поворот вектора координатных ошибок на механическом уровне, приводит к значительному снижению (в 8-10 раз) траекторной ошибки;

- использование процедур идентификации обобщенного параметра  $B_1$  (формула (32)) и автоматическая подстройка коэффициента  $K_0$  из условия (30) обеспечивает практически одинаковое время выхода горелки на линию свариваемого соединения и высокую точность слежения за этой линией: отклонение от линии не превышает  $\pm 0,3$  мм, что значительно меньше, чем у известных систем этого класса;

- текущая коррекция скорости сварки  $V_{св}$  по результатам измерения  $\Delta_2$  обеспечивает вполне удовлетворительную стабилизацию (до 10 %) задаваемого уровня заполнения электродным металлом свариваемого углового шва.

Приведены схемы оригинальных технических решений различных систем, выполненных на уровне изобретения, в том числе двухкоординатной высокоточной системы контурного управления, системы корректирующего управления манипуляционным роботом с кинематической избыточностью, цифровой системы для направления рабочего органа сварочного робота по линии соединения, системы слежения с фиксацией поперечных отклонений от осевой линии свариваемого соединения. Представлены осциллограммы и временные диаграммы работы основных узлов этих систем, даны расчетные формулы и приведены результаты опытной эксплуатации. Выполнена экспериментальная проверка построенных математических моделей.

## ВЫВОДЫ

Основной результат диссертационной работы заключается в теоретическом обобщении и развитии методов корректирующего управления движением по текущим данным оценки некоторого показателя точности и решении на основе этих методов научно-технической проблемы повышения точности широкого класса программных систем, в частности, систем управления сварочными автоматами и роботами.

Полученные научные и практические результаты можно сформулировать в виде следующих положений.

1. Разработаны методы коррекции движения, основанные на повороте и сжатии вектора координатных ошибок и направленные на повышение точности движения по траекториям. Предложены новые структуры систем управления программным движением, реализующие указанные методы.

2. Проведено теоретическое исследование динамических свойств систем с корректирующим управлением. В рамках этого исследования впервые получены:

- математические модели, описывающие в явном виде динамику траекторной ошибки при воспроизведении заданных многообразий традиционными системами и системами с корректирующим управлением;

- алгебраические условия робастной устойчивости движения систем произвольного порядка по криволинейным траекториям;

- робастные условия устойчивости движения систем, описываемых дифференциальными уравнениями низкого порядка;

- оценки точности движения по заданным траекториям и оценки времени протекания переходных процессов.

3. Дано математическое описание динамических процессов, протекающих в сварочном контуре при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа и модель линии сечения свободной поверхности сварочной ванны, формирующейся в процессе сварки углового соединения или стыкового соединения с разделкой кромок. На основе построенных моделей впервые установлены аналитические соотношения, связывающие измеряемые амплитуды старших гармоник колебаний сварочного тока и их фазовые сдвиги с параметрами сварочного контура, режима дуговой сварки,

свариваемого соединения и характеристиками движения горелки и пространственного положения конца электрода относительно линии свариваемого соединения.

4. Предложен принципиально новый метод оценивания изменения в процессе сварки геометрических параметров свариваемого соединения, основанный на измерении амплитуды второй гармоники сварочного тока при поперечных колебаниях сварочной горелки относительно линии этого соединения.

5. Получены условия инвариантности оценки бокового отклонения сварочного инструмента и времени выхода системы на линию свариваемого соединения по отношению к изменению параметров режима дуговой сварки.

6. Предложены научно обоснованные технические решения систем с автоматической коррекцией скорости, с автоматическим поворотом вектора координатных ошибок и с комбинированной автоматической коррекцией, а также систем боковой и продольной коррекции сварочного инструмента.

7. Показано, что разработанные методы и технические решения весьма эффективны и открывают новые возможности существенного повышения точности различного рода программно управляемого оборудования, в частности, сварочных автоматов и роботов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Цыбульский Г.А. Об одном способе регулирования скорости выдачи программы в системах программного управления // Автоматизация научных исследований и технической подготовки производства. - Киев: ИК АН УССР, 1975. - С. 69-74.

2. Цыбульский Г.А. Автоматическое управление темпом выдачи программы в системах программного управления // Там же. 1975. - С. 74-79.

3. Цыбульский Г.А. Об одном способе уменьшения времени вывода информации из ЭВМ на графопостроитель // Там же. 1975. С. 39-46.

4. Скурикин В.И., Ягтецкий Л.С., Цыбульский Г.А. О системах цифрового программного управления с изменением скорости

ввода программы // Управляющие системы и машины. - 1978. - N 4. - С. 29-33.

5. Цыбульский Г.А. Инвариантность и устойчивость одного класса комбинированных программных систем с переменным масштабом времени программ // Теория инвариантности и ее применение. Ч.2. - Киев: Наук. думка, 1979. - С. 128-137.

6. Цыбульский Г.А. Двухсвязные системы управления программным движением при воспроизведении плоских кривых // Автоматика. - 1985. - N 3. - С. 85-89.

7. Цыбульский Г.А. Об одном алгебраическом условии устойчивости линейных динамических систем // Кибернетика и вычисл. техника, 1988, вып. 89. - С. 28-33.

8. Цыбульский Г.А. Координирующее управление движением по двумерному многообразию с перекрестными связями между воспроизводящими системами // Автоматика. - 1988. - N 2, - С. 83-88.

9. Цыбульский Г.А. Адаптивное управление движением горелки в процессе дуговой сварки // Роботизация производства сварных конструкций. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1988. - С. 45-50.

10. Tsybul'kin G.A. A Coordinating Control of Motion Over a Two-Dimensional Manifold with Cross-Connections Between the Reproducing Systems // Soviet Journal of Automation and Information Sciences, Vol. 21, N<sub>o</sub>. 3, 1988, pp. 93-97.

11. Цыбульский Г.А. Повышение точности систем управления программным движением сварочного оборудования // Методы и средства управления электросварочным оборудованием. - Киев: ИЭС им.Е.О.Патона, 1980. - С. 88-89.

12. Тимченко В.А., Цыбульский Г.А., Власов О.В. Использование сварочной дуги как источника информации для "очувствления" промышленного робота РМ 01 // Автомат. сварка. - 1980. - N 10. - С. 69-72.

13. Цыбульский Г.А. Экстремальное управление корректирующим движением сварочной горелки // Датчики систем контроля и управления технологическими процессами сварки. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1991. - С. 28-34.

14. Цыбульский Г.А. Пути повышения точности систем воспроизведения программно заданных траекторий // Там же. - С. 34-40.

15. Цыбульский Г.А. Построение математических моделей в задачах адаптивного управления дуговой сваркой// Автом. сварка. -1994. -N I. - С. 24 - 28.

16. Цыбульский Г.А. Новый метод оценки изменения геометрических параметров свариваемого соединения в задачах технологической адаптации// Там же. -1994. -N 2, -С. 27-30.

17. Цыбульский Г.А. Анализ установившихся режимов некоторых классов нелинейных динамических систем на основе процедур рекуррентного оценивания // Кибернетика и вычисл. техника, 1994, вып. 101. - С. 74-80.

18. Цыбульский Г.А. Воковая коррекция текущего положения сварочного инструмента на основе непрерывного измерения сварочного тока// Автом. сварка. - 1994. -N 7-8. - С. 28-31.

19. Цыбульский Г.А. К вопросу о выборе частоты колебаний сварочного инструмента поперек осевой линии соединения // Там же. - 1994. -N II. - С. 24-28.

20. Цыбульский Г.А. Об инвариантности переходных процессов в системах боковой коррекции пространственного положения сварочного инструмента// Там же. - 1995. N I, - С. 50-51.

21. Цыбульский Г.А. Двухуровневое координирующее управление манипуляционным роботом с кинематической избыточностью // Проблемы управления и информатики. -1995. -N 3. - С. 143-150.

22. Цыбульский Г.А. Аналитическая модель углового соединения, формирующегося в процессе дуговой сварки плавящимся электродом// Автом. сварка. - 1995. N 5, -С. 31-34.

23. А.с. 519842 СССР, МКИ H 03 K 1/16. Генератор импульсов с управляемой частотой следования/ Г.А.Цыбульский. -Опубл. 30.08.78; Бюл. N 24.

24. А.с. 898468 СССР, МКИ G 06 K 11/08. Устройство для считывания графической информации/ Г.А.Цыбульский, В.В.Григоров, А.И.Суходуб. - Опубл. 15.01.82; Бюл. N 2.

25. А.с. 987578 СССР, МКИ G 05 B 19/18. Контурная система программного управления/ Г.А.Цыбульский. -Опубл. 07.01.83; Бюл. N I.

26. А.с. 158873 СССР, МКИ B 23 K 9/10. Устройство слежения за стыком при дуговой сварке/ Г.А.Цыбульский, В.А.Тимченко, О.В.Власов. - Опубл. 23.08.80; Бюл. N 31.

27. А.с. 1708796 СССР, МКИ В 23 К 9/10. Устройство слежения за стыком/ Г.А.Цыбульский, О.В.Власов. -Опубл. 23.01.92; Бюл. N 3.

28. А.с. 1800448 СССР, МКИ G 05 В 19/18. Контурная система программного управления/ Л.С. Житецкий, Г.А.Цыбульский. -Опубл. 07.03.83; Бюл. N 9.

29. А.с. 1822042 СССР, МКИ В 23 К 9/10. Цифровое устройство для направления сварочного робота по стыку/ Г.А.Цыбульский. -Опубл. 10.05.83; Бюл. N 22.

30. Патент России 1800448. МКИ G 05 В 19/18. Контурная система программного управления/ Л.С.Житецкий, Г.А.Цыбульский. Действует с 21.10.1983 г.

31. Цыбульский Г.А. К проблеме избыточности в голономных автоматических системах // Тез. докл. 8-го Симпоз. по пробл. избыточности в информ. системах (Ленинград, июль 1983 г.) -Л.: ЛИАП, 1983. -С. 180-183.

32. Цыбульский Г.А. Об установившихся процессах в некоторых классах нелинейных голономных автоматических системах // Тез. докл. Всесоюз. сем. по динамике нелинейных процессов управления (Таллинн, сент. 1987 г.) -М.: ИПУ, 1987. - С. 37-38.

33. Лебедев В.К., Тимченко В.А., Цыбульский Г.А. Управление пространственным движением адаптивного сварочного робота //Тез. докл. II-го Всесоюз. совещ. по пробл.управления, Ташкент, сент. 1989. - М.: ИПУ, 1989. - С. 349-350.

34. Цыбульский Г.А. Многосвязное управление движением материальной точки по заданному многообразию в трехмерном пространстве // Тез. докл. 8-го Всесоюз. совещ. по управлению многосвязными системами (Суздаль, март 1990 г.) -М.: ИПУ, 1990. - С. 3-4.

35. Цыбульский Г.А., Влас О.В. Об одном способе коррекции программно заданной траектории движения рабочего органа робота // Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. по робототехническим системам (Геленджик, окт. 1990 г.) - М.: ИПУ, 1990. - С. 230-231.

36. Цыбульский Г.А. Координирующее управление движением робота с коррекцией ошибки // Тез. докл. I-ого Всесоюз. конф.

по координирующему управлению в техн. и природных системах (Малый Маяк, окт. 1991 г.) - Харьков: ХПИ, 1991. - С. 42-43.

37. Цыбулькин Г.А. Контроль и коррекция пространственного положения сварочной горелки относительно линии соединения свариваемых деталей // Тез. докл. семинара по автоматизации методов неразрушающего контроля качества (Славское, июнь 1992 г.) - Киев: ИЭС им.Е.О.Патона, 1992. - С. 28-29.

#### Аннотация

Цыбулькин Г.А. Корректирующее управление программным движением сварочных автоматов и роботов.

Диссертация (в виде рукописи) на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация технологических процессов и производств. Ин-т электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины, Киев, 1995.

Работа посвящена теоретическому обобщению и развитию методов повышения точности многоканальных систем управления программным движением сварочных автоматов, роботов и других промышленных установок. В основу методов положена идея корректирующего управления по результатам оценки некоторого показателя точности. Построены аналитические модели и структуры систем с корректирующим управлением, исследованы их динамические свойства. Разработаны методы оценивания отклонений электрода от линии свариваемого соединения и возможных изменений геометрических параметров этого соединения по характеру изменений сварочного тока в процессе сварки. Показана эффективность разработанных методов. Приводятся практические результаты, полученные при создании робототехнологических комплексов для дуговой сварки.

**Ключові слова:** дугове зварювання, зварювальні автомати та роботи, програмно заданий рух, корективне керування, динамічні моделі, стійкість руху, точність відтворення траєкторій

## Abstract

Tsybul'kin G.A. The program motion correcting control of welding automates and robots.

A dissertation (in the manuscript form) for the degree of Doktor of Technical Sciences in speciality 05.13.07 - processes and manufacturing automation. The Paton Institute of electric welding of the Nation. Acad. of Sciences of the Ukraine Kiev. 1995.

The work is devoted to the theoretical generalization and development of methods that improve exactness of the multichannel control systems for welding automates, robots and other industrial machines. Methods base on the idea of correcting control by the estimation of some characteristic of exactness. Analytic models and structures of correcting control systems are built. Their dynamic properties are studied. The estimation methods of welding gun deviation from the center line of welding joints and the changes of geometrical joint parameters by the behaviour of welding current are developed. Efficiency of methods developed is shown. Experimental results obtained in developing robotics systems for arc welding are applied.

Подп. в печ. 16.10.95. Формат 60x84/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.  
Усл. печ. л. 1,86. Усл. кр.-отт. 2,09. Уч.-изд. л. 1,93. Тираж  
100 экз. Зак. 5-241р.

---

ИЭС им. Е.О. Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.  
ПОП ИЭС им. Е.О. Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.



AB 33.287