

**АВТОМАТИЗАЦИЯ**



**СВАРОЧНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

# АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Под редакцией академика  
АН УССР В. К. Лебедева  
и профессора В. П. Черныша

*Допущено Министерством высшего  
и среднего специального образования УССР  
в качестве учебного пособия для студентов вузов,  
обучающихся по специальностям  
«Электротермические установки»,  
«Оборудование и технология  
сварочного производства»*

Киев  
Головное издательство  
издательского объединения  
«Вища школа»  
1986

УДК 65.011.56:621.791(07)

Автоматизация сварочных процессов/Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша.— К.: Вища шк., Головное изд-во, 1986.— 296 с.

В учебном пособии дан анализ технологических процессов сварки как объектов автоматического управления и рассмотрены способы их описания. Основное внимание уделено структуре и работе локальных регуляторов, применяемых при автоматизации типовых сварочных процессов. Рассмотрены принципы построения систем управления на основе микропроцессорной техники и примеры их использования для автоматизации сварочных процессов, функции промышленных роботов, их состав и особенности применения для автоматизации сварки.

Для студентов, обучающихся по специальностям «Электротермические установки» и «Оборудование и технология сварочного производства».

Табл. 7. Ил. 227. Прил. 22. Библиогр.: 57 назв.

Рецензенты: кафедра «Оборудование и технология сварочного производства» (Краматорский индустриальный институт), кандидат технических наук доцент С. Л. Миличенко (Запорожский машиностроительный институт)

Редакция учебной и научной литературы по машиностроению и приборостроению

Зав. редакцией О. А. Добровольский

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года в качестве основных задач по ускорению научно-технического прогресса и развитию науки рассматривается внедрение автоматизированных систем в различные сферы хозяйственной деятельности, и в первую очередь в проектирование, управление оборудованием и технологическими процессами, создание высоконадежных систем промышленной автоматизации на базе электроники\*.

Успешное решение указанных задач имеет важное значение для дальнейшего развития сварочного производства, которое характеризуется применением сложных технологических процессов, большим количеством определяющих их ход параметров, высокими скоростями передачи и обработки информации. Достижение заданного качества сварных соединений при одновременном улучшении условий и повышении производительности труда рабочих, а также снижении себестоимости сварных изделий требует комплексной автоматизации сварочного производства, важной составной частью которой является автоматизация собственно сварочных процессов.

Введение в учебные планы сварочных специальностей вузов курса «Автоматика и автоматизация сварочных процессов» и издание в 1982 г. Н. С. Львовым и Э. А. Гладковым учебного пособия [15] по этому курсу позволили существенно улучшить подготовку выпускников вузов по созданию и эксплуатации оборудования для автоматизации сварочных процессов. Однако необходимость в учебной литературе, обобщающей современные достижения и ведущие тенденции в этой области, сохраняется.

В книге описан в значительной степени опыт Института электро-сварки им. Е. О. Патона АН УССР по созданию системы автоматического управления базовыми сварочными процессами и Киевского политехнического института по преподаванию студентам сварочных специальностей курса «Автоматика и автоматизация сварочных процессов». Материал книги, рекомендуемой в качестве учебного пособия по указанному курсу, предназначен для студентов и специалистов сварочного производства, имеющих подготовку по теории автоматического управления, и размещен по способам сварки, что позволяет наиболее полно охарактеризовать особенности и состояние автоматизации основных сварочных процессов.

Авторы стремились без ущерба для полноты изложения материала ограничиться при его отборе только теми решениями, которые харак-

---

\* Материалы XXVII съезда Коммунистической партии Советского Союза.— М.: Политиздат, 1986.— С. 280, 288.



терны для современного уровня автоматизации сварочных процессов либо найдут применение в ближайшие годы. Материал, который может быть полезен при выполнении дипломного и курсового проектирования, вынесен в приложения.

Применение для автоматизации технологических процессов промышленных роботов позволяет пересмотреть распределение на производстве функций между человеком и машиной и на значительно более высоком уровне решать вопросы автоматизации сварочных процессов. Поэтому в учебное пособие введена специальная глава, посвященная промышленным роботам для автоматизации процессов сварки.

Книга может быть использована специалистами, не имеющими базовой подготовки в области сварочного производства, но занимающимися вопросами его автоматизации.

В работе над книгой участвовала большая группа специалистов, что обусловлено широким кругом рассматриваемых задач. Главы 1, 2 и приложения написаны В. П. Чернышом, Ю. Н. Кутеповым, Л. А. Искрой, Ф. Н. Киселевским, Р. М. Широковским, В. А. Тимченко; глава 3 — О. П. Бондаренко; глава 4 — Ю. Н. Ланкиным; глава 5 — В. С. Гавришем и В. П. Кривоносом; глава 6 — В. А. Тимченко и Ф. Н. Киселевским.

# 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

## 1.1. Автоматизация сварочных процессов как часть комплексной автоматизации сварочного производства

Сварка — ведущий технологический процесс при производстве металлических конструкций. С ее помощью перерабатывается примерно 70 % готового проката, что составляет около половины всей стали, производимой в СССР. Сварочное производство оказывает существенное влияние на выполнение программы хозяйственного развития страны и решение задач по повышению эффективности и интенсификации общественного производства. В отличие от других металлообрабатывающих производств сварочное охватывает обширный комплекс различных по своему характеру технологических операций, обеспечивающих изготовление заготовок и деталей, их сварку, термическую обработку, контроль качества соединений и отделку готовых сварных изделий [23].

Обеспечение требуемого уровня качества сварных конструкций и их эксплуатационной надежности, повышение производительности труда при улучшении условий работы людей требуют комплексной механизации и автоматизации в одном синхронизированном потоке всех переделов, связанных с изготовлением сварной конструкции. Примером такой организации производства является изготовление электросварных труб, отопительных радиаторов и других изделий с массовым характером выпуска продукции [21].

Однако не всегда целесообразно концентрировать в одном потоке все операции по изготовлению данной продукции [40]. Так, при достаточно большой и разнообразной номенклатуре заготовок, требующих, например, механической обработки, их изготовление не включается в состав операций сварочного производства и выполняется в других цехах, специализированных по видам обработки, или в отдельном заготовительном цехе.

*Цель автоматизации сварочных процессов* — получение сварных соединений с требуемыми свойствами при наивысших технико-экономических показателях без непосредственного участия человека.

Социальный аспект автоматизации, предполагающий освобождение человека от непосредственного выполнения функций управления сварочными процессами и передачу этих функций автоматическим устройствам, в последние годы приобретает все большую значимость. Как отметил академик Б. Е. Патон, «...гуманное желание освободить человека от трудного и утомительного труда в сварочном производстве путем его механизации и автоматизации становится все более важным, а иногда и решающим фактором при определении целесообразного уровня, методов и технических средств механизации и автоматизации сварочного производства в целом и процессов собственно сварки — в частности» [23, с. 2].

В общем объеме операций по производству сварных конструкций собственно сварочный процесс составляет 15—20 % и не превышает 30% [21]. Однако он является ключевым элементом производства, определяющим конечные свойства и эксплуатационную надежность сварных соединений и всей конструкции. Автоматизация сварочных процессов, при которой повышается точность управления и контроля, а также исключается влияние на технологический процесс субъективных факторов (мастерство работающего, его утомляемость и т. п.), направлена прежде всего на повышение качества сварных соединений и его стабилизацию в пределах всей партии однотипных изделий.

Автоматизация оказывается обязательным условием успешного выполнения сварочных процессов, так как большое количество и высокие скорости изменения определяющих их ход параметров связаны с обработкой значительной по объему информации в единицу времени, что оказывается недоступным человеку. Не случайно первые автоматические регуляторы дуги были предложены изобретателями дуговой сварки Н. Н. Бенардосом и Н. Г. Славяновым [39]. Н. Г. Славянов указывал, что если электрод плавкий, то невозможно поддерживать непрерывную вольтовую дугу без автоматического регулирования. Исходя из этого, он полагал, что только наличие регуляторов дуги может обеспечить реальную возможность промышленного применения дуговой сварки плавящимся электродом.

Достижимое в результате применения автоматизации исключение или сведение к минимуму количества недопустимых дефектов сварных швов снижает потери рабочего времени, энергетических и материальных ресурсов, связанные с исправлением брака. Все это сопровождается реальным повышением производительности труда, экономией трудовых ресурсов при изготовлении сварных конструкций и позволяет рассматривать автоматизацию сварочных процессов как важную составляющую комплексной автоматизации сварочного производства.

Эффективность автоматизации сварочных процессов во многом определяется точностью подготовки заготовок и их сборкой. Если при изготовлении деталей методами механической обработки (точении, фрезеровании и т. п.) заранее задают требуемые конечные размеры детали с необходимыми допусками и размеры заготовки не влияют на точность готовой детали, то при сварке изменить фактические размеры заготовок невозможно, так как они уже определены предыдущими технологическими (заготовительными) операциями и, следовательно, определяют все линии швов с их неточностями по направлению, зазору, превышению кромок и др. Точность же изготовления заготовок сварных узлов и конструкций и их сборки под сварку при традиционных технологиях выполнения этих операций обычно во много раз ниже точности деталей, поступающих на узловую сборку после их механической обработки [40]. Однако из плохих заготовок нельзя сделать хороших сварных изделий, так как даже самые совершенные сварочные автоматы не могут исправить все дефекты заготовок. Поэтому автоматизация сварочных процессов целесообразна и эффективна только при повышении точности заготовок и их сборки, что достигается механизацией и автоматизацией заготовительных и сборочных операций. Однако возможности заготовительного произ-

водства не беспредельны. Кроме того, неизбежны температурные деформации и перемещения свариваемых деталей вследствие неравномерности нагрева изделия при сварке. Все это приводит к отклонениям точности собранных заготовок за пределы, допустимые по условиям механизированной сварки. Применение автоматического управления сварочными процессами для предупреждения их нарушений под действием различных возмущений является одним из основных этапов создания систем комплексной автоматизации сварочного производства.

## 1.2. Технологические процессы сварки как объекты автоматического управления. Способы их описания

Современный уровень развития сварочной техники и технологии отличается большим разнообразием источников нагрева, их энергетических характеристик и способов теплового воздействия на изделие. При рассмотрении процессов сварки как объектов автоматического управления целесообразно исходить из общей для всех способов сварки последовательности преобразования энергии.

Электрическая энергия, поступающая из промышленной сети, преобразуется в *источнике питания* в форму, наиболее полно соответствующую каждому конкретному *источнику нагрева*, который затем преобразует электрическую энергию в термическое воздействие на *изделие* и присадочный материал.

Таким образом, формирование сварного соединения можно рассматривать как результат функционирования системы «источник питания — источник нагрева — изделие» (рис. 1.1). Отдельные компоненты этой системы объединены обратными связями в сложную много-связную систему. Действие этих связей проявляется в том, что изменения процесса формирования сварочного соединения оказывают обратное воздействие на источники нагрева и питания. Так, при дуговой сварке изменения глубины проплавления сопровождаются изменением длины дуги, в результате чего изменяется напряжение дуги и режим работы источника питания. При электрошлаковой сварке изменение температуры шлаковой ванны приводит к изменениям скорости плавления электрода и тока сварочного трансформатора.

В современных сварочных установках для питания сварочных цепей используют источники переменного тока (трансформаторы специальных конструкций), источники постоянного тока (сварочные выпрямители и генераторы разнообразных конструкций), источники питания аккумуляторной энергией.

Из сварочных источников нагрева наибольшее распространение получили: электрическая дуга (дуговая и плазменная сварка); джоулево тепло, образующееся при прохождении электрического тока

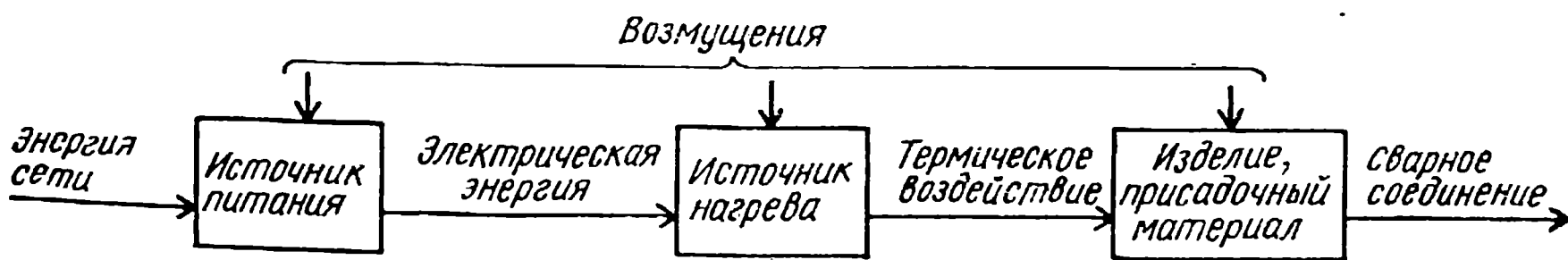


Рис. 1.1. Обобщенная схема сварочного процесса

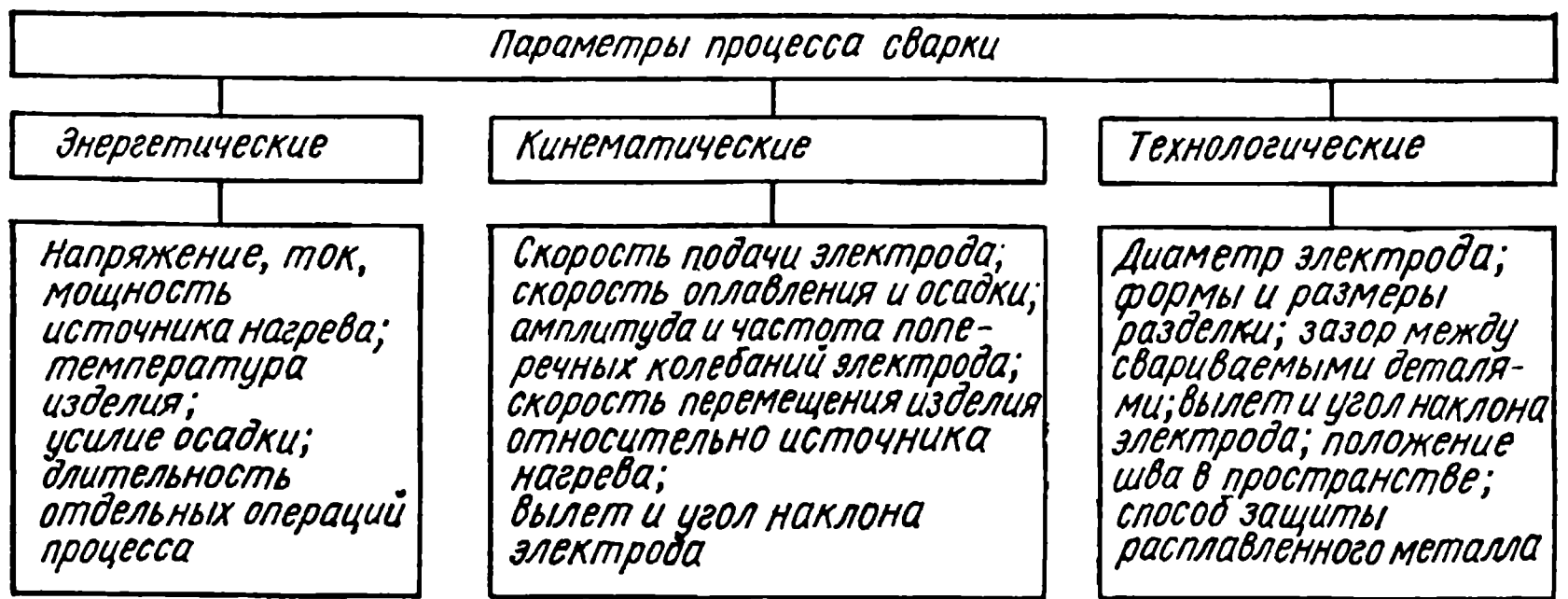


Рис. 1.2. Классификация параметров процесса сварки

через расплав шлака (электрошлаковая сварка) или металл свариваемых деталей (контактная сварка); электронный луч (электронно-лучевая сварка); луч лазера и др.

Каждый сварочный процесс можно охарактеризовать некоторым числом обобщенных координат (параметров сварочного процесса), между которыми существуют определенные связи. Например, между током и напряжением на дуге существует связь, определяемая свойствами источника питания. Частота коротких замыканий дугового промежутка каплями расплавленного металла зависит от тока и напряжения на дуге, но эта зависимость не однозначна, она имеет вероятностный характер и может быть представлена в виде соответствующей корреляционной функции.

Все многообразие параметров процесса сварки можно условно разделить на три группы (рис. 1.2):

*энергетические*, характеризующие вклад энергии в процесс образования сварного соединения;

*кинематические*, характеризующие пространственное перемещение или положение источника нагрева относительно изделия;

*технологические*, характеризующие условия формирования и кристаллизации сварных швов, переноса электродного металла.

В производственных условиях технологический процесс сварки подвержен воздействиям — возмущениям, нарушающим его нормальное протекание и приводящим к отклонениям показателей качества сварного соединения от требуемых значений. Возмущения могут быть приложены к любому из трех компонентов сварочного процесса (рис. 1.1), однако классифицировать их удобнее не по месту приложения, а по аналогии с параметрами сварочного процесса (рис. 1.3).

Источниками энергетических и кинематических возмущений являются промышленная сеть и в основном собственно сварочное оборудование: источники питания, аппаратура управления, приводы подачи электрода, перемещений и т. д. Источник технологических возмущений — несовершенство технологии подготовки заготовок и их сборки.

Совершенствование конструкций сварочного оборудования, применение тиристорных приводов, современной техники управления сварочным циклом позволяют устранить многие из энергетических и кине-

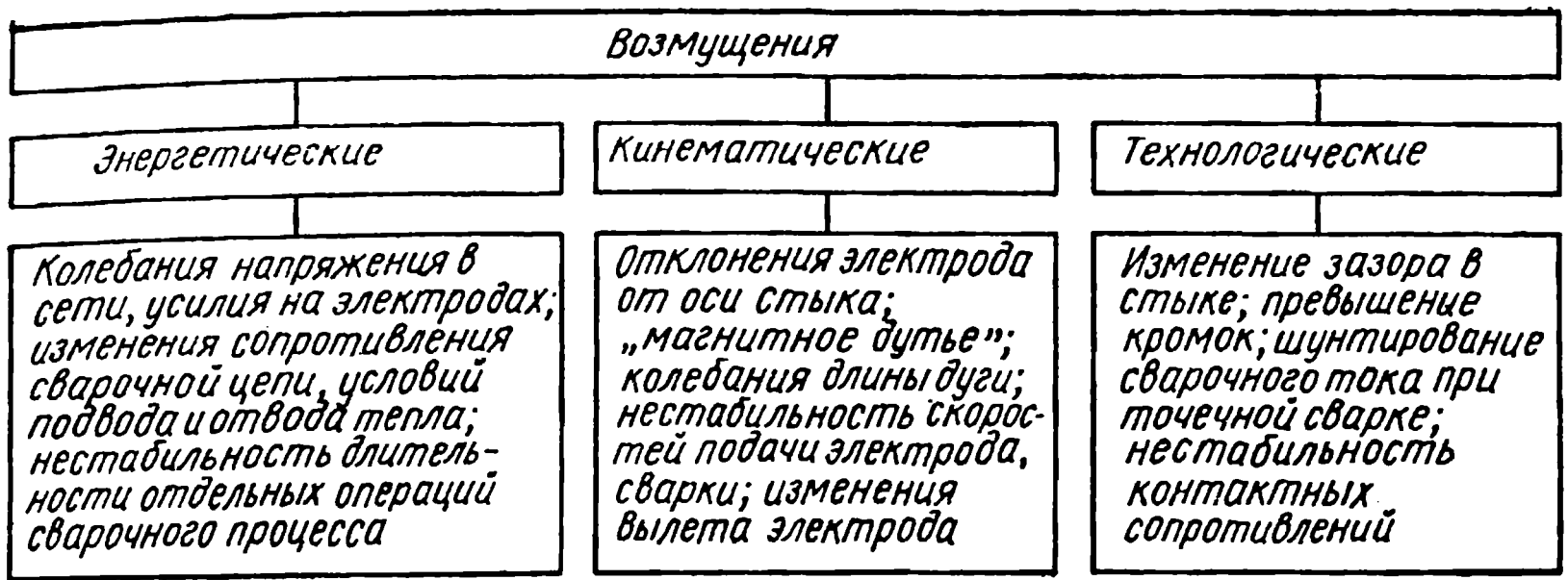


Рис. 1.3. Классификация возмущений

матических возмущений. В то же время трудно обеспечить устранение всех технологических возмущений, поскольку связанное с этим усложнение технологической оснастки и технологии заготовки, сборки и сварки изделий не всегда технически возможно и экономически оправдано. Чтобы оценивать влияние возмущений на технологические характеристики сварного соединения, необходимо учитывать закон изменения возмущений, который может быть заранее известен или неизвестен, и инерционность процесса формирования сварного соединения. Например, возмущения по длине дуги и углу наклона электрода, возникающие при наплавке кромок штамповых матриц по рабочему контуру, можно определить заранее с достаточной точностью. Однако обычно возмущения имеют случайный характер, например, колебания напряжения сети в течение рабочего дня, возникающие при включении и отключении соседних мощных потребителей электроэнергии (рис. 1.4).

Инерционность формирования сварного соединения обусловлена особенностями распространения тепла в изделии. Числовой характеристикой инерционности процесса нагрева и плавления металла изделия является тепловая постоянная  $\tau_t$ , которая измеряется в единицах времени, определяется теплофизическими свойствами материала, объемом сварочной ванны и энергетическими характеристиками источника нагрева.

Если время воздействия возмущения  $t_b \ll \tau_t$ , то такое возмущение, не приводящее к нарушению процесса, например обрыву дуги, практически не отражается на геометрии сварного соединения. Ступенчатые и аperiodические возмущения могут привести к изменению формы сварных соединений, что требует введения ограничений на величину такого рода возмущений.

Периодические возмущения с амплитудой, ограниченной условиями устойчивости процесса, не влияют большей частью на размеры соединений, если частота колебаний  $f \gg 1/\tau_t$ . Например, при автоматической сварке под флюсом сталей электродом диаметром 5 мм граничная частота колебаний скорости подачи электрода  $f_{гр} = 1,5 \div 2$  пер./с [24].



Рис. 1.4. Отклонения напряжения сети  $U_c$  от номинального  $U_{c,н}$  в течение рабочей смены



В результате анализа современных сварочных процессов как объектов управления выявлены их характерные особенности, указывающие на актуальность задачи их полной автоматизации:

скоротечность некоторых этапов энергетических преобразований и процесса сварного соединения;

недоступность зоны сварки для непосредственного измерения и контроля;

повышенный уровень вредных воздействий на здоровье человека;

необходимость оперативной оптимизации сварочных процессов в соответствии с выбранным критерием (например, минимизация сварочных деформаций и т. п.)

Непосредственное решение общей задачи автоматизации сварочных процессов затруднено многомерностью объектов автоматизации, поэтому эта задача обычно расчленяется на отдельные частные, в которых система «источник питания — источник нагрева — изделие» рассматривается в виде упрощенной совокупности одномерных объектов. При этом в качестве переменных принимаются только параметры, в той или иной степени характеризующие процесс образования сварных соединений и подлежащие в связи с этим стабилизации или изменению по заранее выбранному закону.

Качественный анализ сварочных процессов как объектов автоматического управления и четкое понимание происходящих в них явлений позволяют перейти к определению количественных характеристик этих объектов. Решение этой задачи в общем случае называется *идентификацией объекта*. При этом реальный объект отождествляют некоторой принятой априори формализованной модели.

Для одномерных объектов управления связь между входной и выходной величинами в установившемся состоянии определяется статической характеристикой. При исследовании объектов из множества их статических характеристик в каждом конкретном случае используется только та, которая связывает параметры процесса, подлежащие управлению. Наиболее широкое применение статические характеристики находят при исследовании устойчивости системы «источник питания — источник нагрева» [33].

В большинстве случаев сварочные процессы можно описать с достаточной точностью нелинейными дифференциальными уравнениями, анализ и решение которых сложны. Поэтому прибегают к линеаризации таких уравнений, ограничивая тем самым изучение процесса только случаем малых отклонений его от равновесного состояния.

Методы исследования объектов по их статическим характеристикам и линейным дифференциальным уравнениям позволяют составить лишь общее суждение об их устойчивости и динамических свойствах, необходимое для решения сравнительно простых задач управления. Современный уровень развития сварочного производства требует решения качественно более сложных задач, основными из которых являются:

- 1) оптимизация управления сварочным процессом;
- 2) прогнозирование качественных показателей сварных соединений в процессе сварки;

3) построение адаптивных и самонастраивающихся систем управления сварочными процессами.

Для решения этих задач необходимо формализовать описание объекта управления, так как только тогда можно привлечь мощный аппарат технической кибернетики. Такая формализация осуществляется представлением сварочного процесса в виде его математической модели, описывающей только те особенности процесса, которые существенны для его управления, а также ограничены, обусловленные технологическими, экономическими и другими причинами. При такой постановке задачи цель моделирования — установление математической зависимости между показателем качества ( $y_n$ ) и параметрами ( $x_{pn}$ ) процесса (рис. 1.5):

$$y_n = A \{x_{1n}, \dots, x_{pn}\}.$$

Математические модели можно получить с использованием двух основных методов.

Сущность *первого метода* заключается в установлении связей между входными и выходными параметрами на основании существующих физических закономерностей процесса. Модели, представляемые в виде уравнений, называются детерминированными и могут быть статическими и динамическими. Статические модели наиболее простые и описываются алгебраическими уравнениями, которые не учитывают случайные изменения параметров, переходные процессы, а также медленные изменения характеристик объекта во времени, связанные с износом оборудования, старением и т. д. Более сложными являются детерминированные динамические модели, отражающие особенности поведения объекта во времени. Как правило, такие модели представляют собой дифференциальные уравнения в частных производных. Не менее сложны стохастические (вероятностные) модели, в которых часть или все характеристики процесса описываются случайными функциями времени.

Сущность *второго метода* получения математических моделей заключается в установлении связей между входными и выходными параметрами на основании экспериментально-статистических методов, позволяющих получить модель в виде уравнений регрессии, описывающих корреляционную зависимость между этими параметрами, являющимися случайными величинами. Для количественной оценки величины связи используется метод регрессионного анализа. Такие статистические модели достаточно полно отражают закономерности процесса при сварке конкретного изделия (марки материала, толщины) на данном типе оборудования и определенном режиме и позволяют с необходимой точностью прогнозировать качество сварного соединения и управлять процессом сварки для обеспечения заданных размеров швов.

Любой сварочный процесс можно описывать множеством моделей, каждая из которых в рамках определенной концепции фиксирует формализованное отражение сложной реальности. При построении математической модели необходимо иметь в виду, что сложная, учитывающая множество деталей процесса модель обычно оказывается малоэффективной. Это объясняется тем, что сварочные процессы настоль-

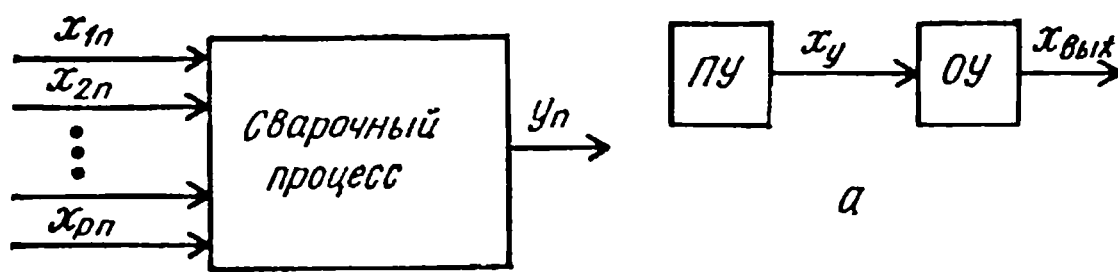


Рис. 1.5. Формализованное представление сварочного процесса:

$x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{pn}$  — параметры режима сварки;  $Y_n$  — выбранный показатель качества сварного соединения;  $n$  — количество реализаций процесса (число сварок)

ко сложны, что их подробные детализированные модели оказываются очень громоздкими и вычисления по ним приводят к значительным ошибкам. Поэтому всю выборку экспериментальных данных подвергают корреляционному анализу и на этой основе включают в модель только те параметры  $x_{pn}$  (см. рис. 1.5) процесса, которые наиболее тесно связаны (коррелированы) с качественным показателем  $Y_n$ .

### 1.3. Современные системы и средства автоматического управления. Области их применения при сварке

Сварочные процессы как объекты регулирования при правильном подборе их статических и динамических характеристик являются энергетически устойчивыми, т. е. обладают положительным самовыравниванием. Однако переход их под действием возмущений из одного энергетического состояния в другое сопровождается изменениями параметров режима сварки (тока, напряжения, скорости плавления и т. д.), т. е. появлением статических ошибок.

Если эти ошибки невелики и их влиянием на качество сварки можно пренебречь, то наиболее удобным способом управления оказывается *программное* по разомкнутому циклу (рис. 1.6, а). Программирующее устройство (ПУ) изменяет управляющее воздействие  $x_y$  по заранее известному закону, в соответствии с которым необходимо изменить управляемую величину  $x_{вых}$  в объекте управления (ОУ).

Разомкнутые системы программного управления (СПУ) получили широкое применение прежде всего из-за самой специфики сварочного производства, вытекающей из необходимости использования универсального оборудования для изготовления разнообразной номенклатуры изделий. СПУ, обеспечивая возможность быстрой перестройки сварочного процесса при переходе от одного типоразмера к другому простой сменой программы, наиболее полно отвечают требованиям индивидуального и мелкосерийного производств.

Временное программирование последовательности основных операций сварочного цикла широко применяется при автоматизации различных способов сварки. Объектами программного управления могут быть перемещения источника нагрева, подача присадочного материала при сварке плавлением, изменения сварочного тока при контактной сварке, перемещения свариваемых деталей. Операции возбуждения дуги и заварки кратера программируются при согласованном изменении скорости подачи электрода и моментов включения и выключения источника питания. В некоторых случаях программирование сварочного режима вызывается нестационарностью температур-

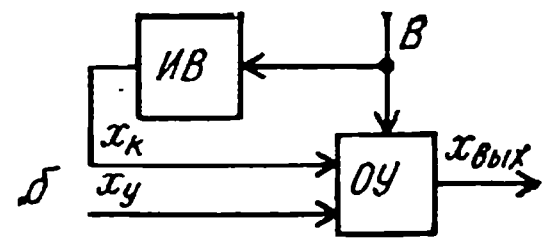
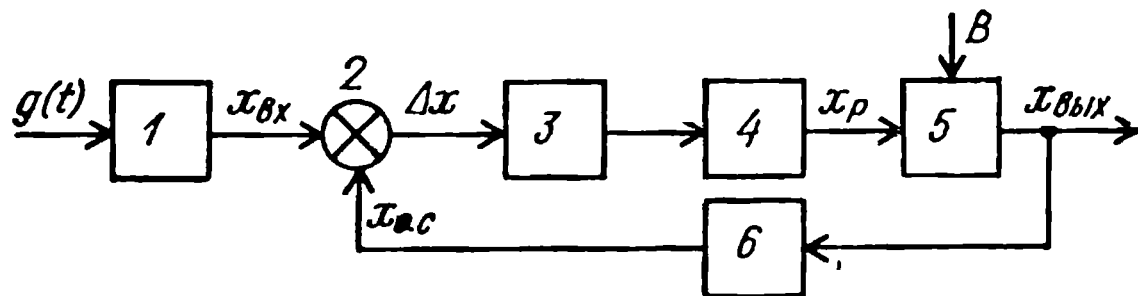


Рис. 1.6. Разомкнутые системы управления

Рис. 1.7. Схема замкнутой САР:

1, 2, 3, 4, 6 — задающее, сравнивающее, преобразующее, исполнительное и измерительное устройство соответственно; 5 — объект регулирования



ного поля в изделии и разветвлением теплового потока дуги (например, при сварке кольцевого стыка) на основной, движущийся вместе с дугой, и встречный, движущийся навстречу дуге. Встречный поток изменяет условия формирования шва по сравнению с условиями сварки на непрогретом металле. Корректирование теплового режима осуществляется программным регулированием скорости сварки и тока дуги.

Рациональной областью применения СПУ без обратных связей является также наплавка сложных поверхностей штампов и штамповых матриц [24]. В этом случае программируется перемещение наплавочной головки по трем пространственным координатам и ее поворот вокруг каждой из осей в соответствии с профилем наплавляемой поверхности. Основной недостаток разомкнутых СПУ — их низкая точность при действии на объект регулирования разного рода возмущений, поскольку жесткое программирование исключает учет влияния возмущающих воздействий на регулируемую величину. Это влияние можно уменьшить, применяя разомкнутые системы компенсации (рис. 1.6,б). При отсутствии возмущения  $B$  регулируемая величина  $x_{\text{вых}}$  изменяется в соответствии с законом, задаваемым управляющим воздействием  $x_y$ . При возникновении возмущения последнее измеряется измерителем возмущений ( $ИВ$ ), формирующим компенсирующее воздействие  $x_k$ , устраняющее влияние возмущения на  $x_{\text{вых}}$ .

Если обеспечивается полное устранение этого влияния, то рассматриваемая система оказывается инвариантной по отношению к данному возмущению. Практическое осуществление полностью инвариантных систем управления сварочными процессами затруднено, так как необходимо измерять и компенсировать все действующие возмущения. Поэтому применяют системы компенсации только одного, основного, возмущения.

Системы компенсации используют для стабилизации э. д. с. источников питания в условиях колебаний сетевого напряжения, для компенсации постоянной составляющей тока в вентильных прерывателях при точечной и шовной сварке и т. п.

Разомкнутые системы управления обладают существенным недостатком принципиального характера — закон изменения управляющего воздействия не учитывает действительного (фактического) изменения регулируемой величины под действием неучтенных возмущений, изменений характеристик объекта регулирования и т. п. В тех случаях, когда использование разомкнутых систем малоэффективно, применяют замкнутые системы автоматического регулирования (САР) (рис. 1.7). В таких системах изменение регулирующего воздействия  $x_p$ , определяющего изменение величины

$x_{\text{вых}}$  на выходе объекта происходит до тех пор, пока  $x_{\text{вых}}$  не достигнет требуемого значения. Тогда

$$\left. \begin{aligned} |x_{\text{вх}}| &= |x_{\text{о.с}}|; \\ \Delta x &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

и САР приходит в состояние равновесия. Если под действием возмущения  $V$  или по каким-либо другим причинам  $x_{\text{вых}}$  отклонится от установленного значения, нарушится условие (1.1), что явится причиной автоматического изменения  $x_{\text{вых}}$  до ее восстановления.

Сигнал  $x_{\text{о.с}}$  обратной связи должен быть противоположным (отрицательным) по отношению к входному сигналу  $x_{\text{вх}}$ , так как только в этом случае сигнал ошибки  $\Delta x$  может обратиться в нуль или достаточно малую величину, при которой наступает равновесное состояние.

По существу локальные регуляторы, отраженные на рис. 1.7 устройствами 1—4, 6, представляют собой малые аналоговые (реже цифровые) вычислители, которые решают уравнение

$$x_p = k_0 + k_1 \Delta x + k_1 k_2 \int \Delta x dt + k_1 k_3 \frac{d\Delta x}{dt},$$

где  $k_0, k_1, k_2, k_3$  — коэффициенты, определяемые параметрами настройки устройств 3 и 4 регулятора.

В зависимости от количества членов уравнения, используемых при регулировании, получают пропорциональные, пропорционально-интегральные и пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы. Изменением параметров настройки регулятор может быть приспособлен для решения различных задач управления. Более сложные из них требуют применения систем, включающих несколько регуляторов.

Если задающее воздействие  $g(t) = \text{const}$  (см. рис. 1.7), то САР обеспечивает автоматическую *стабилизацию*, т. е. постоянство регулируемой величины  $x_{\text{вых}}$ . Автоматическая стабилизация параметров сварочных режимов широко распространена, так как позволяет во многих случаях удовлетворительно решить задачу по стабилизации качественных характеристик сварных соединений.

Интенсивно разрабатываются системы автоматической стабилизации проплавления при дуговой, плазменной и электронно-лучевой сварке при действии возмущений технологического характера (см. рис. 1.3).

Замкнутыми системами являются *системы программного регулирования* (СПР), у которых закон изменения задающего воздействия  $g(t)$  — заранее известная функция времени. Такие системы по сравнению с разомкнутыми СПУ находятся на качественно более высоком уровне, так как благодаря наличию обратных связей они обладают значительно более высокой точностью, особенно в условиях действия случайных технологических возмущений. Например, при электронно-лучевой сварке деталей теплообменников — труб с трубными досками разомкнутые СПУ перемещением электронно-лучевой пушки оказываются малоэффективными вследствие существующего допуска на размеры межцентровых расстояний отверстий в трубной доске



и погрешностей ориентации теплообменника в координатной плоскости. Поэтому для коррекции программы перемещения электронного луча применяют обратную связь по взаимному положению луча и свариваемых кромок. Широкое применение найдут СПР в системах управления сварочными манипуляторами с программным управлением (промышленными роботами) при сварке нестрого ориентированных швов. В этом случае сигнал обратной связи от датчика положения стыка используется для коррекции основной жесткой программы перемещения сварочного инструмента [25].

Среди замкнутых САУ особое место занимают *следящие системы*, для которых закон изменения задающего воздействия  $g(t)$  (см. рис. 1.7) — заранее неизвестная функция времени. Следящие системы применяют для автоматического ведения электрода по оси стыка при дуговой сварке криволинейных швов, а также прямолинейных стыков большой протяженности, так как фактически такие стыки не являются прямыми вследствие погрешностей их подготовки под сварку, тепловых деформаций и т. д.

Телевизионные следящие системы отличаются возможностью не только автоматического управления, но и непосредственного дистанционного наблюдения за зоной сварки. Телевизионные следящие системы применяются в трубном производстве при аргодуговой сварке неплавящимся электродом и при электронно-лучевой сварке.

Рассмотренные системы автоматического регулирования объединяет общее для них свойство: все они предназначены для воспроизведения заранее заданного закона управления сварочным процессом. Автоматические системы с жестким алгоритмом дают хорошие результаты при априорно известных воздействиях и то в определенном диапазоне их изменений. Необходимость перестройки аппаратуры управления при изменении типоразмера свариваемых деталей и характеристик оборудования создает неудобства при использовании простейших одноконтурных систем автоматического управления. Удовлетворение современных требований высокой точности, быстродействия и, главное, сохранения наивыгоднейших (оптимальных) характеристик сварочного процесса в широком диапазоне изменения внешних условий и свойств объекта управления возможно при использовании *адаптивных* (самоадаптирующихся) систем автоматического управления (САУ). Такие САУ способны в процессе выполнения основной задачи управления изменять свои характеристики для компенсации действующих на систему возмущений.

Основной контур (рис. 1.8) адаптивной САУ служит для реализации заданного закона регулирования выходной переменной  $x_{\text{вых}}$ . Стабилизация или оптимизация динамических свойств системы в процессе ее работы достигается применением контура адаптации, испол-

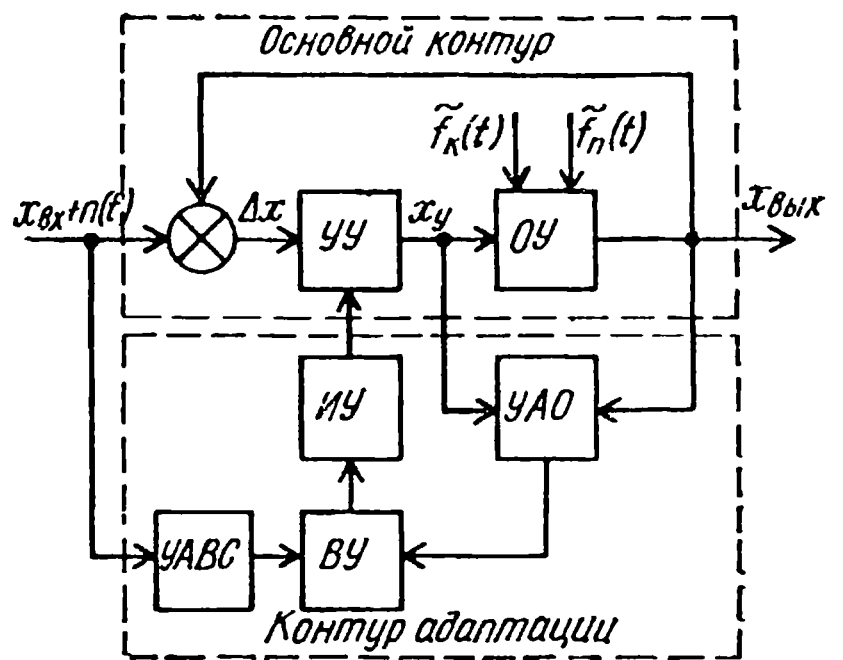


Рис. 1.8. Функциональная схема адаптивной САУ



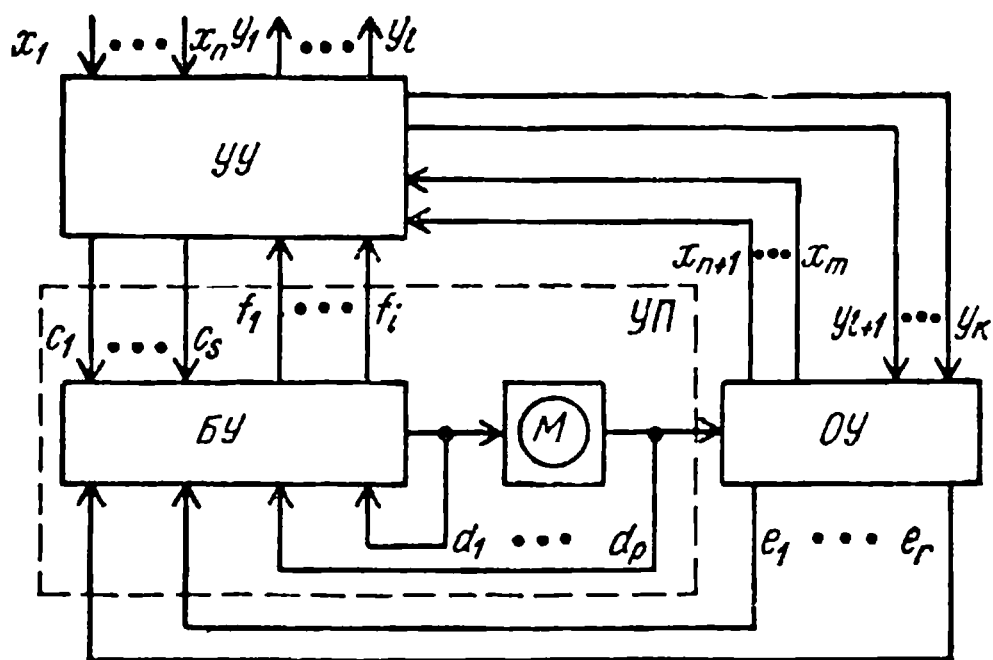


Рис. 1.9. Обобщенная функциональная схема системы управления сварочным процессом

основе заложенных в нем критериев оптимальности системы и информации, получаемой от устройств анализа входного сигнала (УАВС) и объекта (УАО). В адаптивных системах с эталонной моделью происходит непрерывное сравнение реакций модели и системы на одни и те же входные воздействия. Контур адаптации используется для приближения реакции системы к реакции модели путем преобразования разницы между ними в изменение параметров УУ.

Реальные адаптивные САУ содержат все или часть перечисленных основных элементов и могут использовать различные алгоритмы самонастройки. Применение адаптивных САУ должно быть наиболее эффективным при высоком уровне возмущений технологического характера.

Надежность и качество работы любых автоматических систем во многом определяется совершенством их исполнительных устройств.

Основу большинства исполнительных устройств сварочных установок составляют электродвигатели  $M$  (рис. 1.9) с блоком управления (БУ). Наличие между  $M$  и БУ обратных связей, выполненных на основе таходатчиков или датчиков положения, придает такому управляемому электроприводу (УП) функции исполнительного устройства локального регулятора, включенного между устройством управления (УУ) и объектом (ОУ) и входящего в состав сварочной установки. Устройство управления представляет собой электрическую часть установки, выполняющую программно-логическую функцию управления. Элементную базу УУ составляют реле, транзисторы, аналоговые и цифровые микросхемы или вычислительные устройства. В состав исполнительного устройства кроме двигателя входят: различные механизмы, предназначенные для подачи в зону сварки электродной проволоки, ленты для перемещения сварочного инструмента; другие устройства механической части установки с размещенными на них датчиками положения, температуры, давления, конечными выключателями и т. п.

Устройство УУ связано командными и управляющими входными  $x_1 \dots x_n$  и выходными  $y_1 \dots y_l$  сигналами с другими системами управления и человеком-оператором. Обмен информацией между УУ и ОУ осу-

нительное устройство (ИУ) которого изменяет параметры управляющего устройства (УУ) с учетом наличия помех  $n(t)$  во входном сигнале  $x_{вх}$  и изменения динамических характеристик объекта ОУ под действием координатных  $f_k(t)$  или параметрических  $f_n(t)$  возмущений. Способ изменения характеристик УУ (его параметров, структуры или закона управления) определяет вычислительное устройство (ВУ) на

ществляется по каналам  $x_{n+1} - x_m$  и  $y_{l+1} - y_k$ , а между  $УУ$  и  $БУ$  — по каналам  $f_1 - f_i$  и  $c_1 - c_s$ . Входные сигналы  $x_{n+1} - x_m$  и  $f_1 - f_i$  содержат информацию о состоянии алгоритма функционирования  $ОУ$ . По выходным каналам  $y_{l+1} - y_k$  и  $c_1 - c_s$  передаются команды управления, приведенные к уровням  $ОУ$  и  $БУ$ , по выходам  $y_1 - y_l$  передается сигнальная информация и команды управления в другие системы управления.

Привод  $УП$ , получая командные сигналы  $c_1 - c_s$  от  $УУ$ , осуществляет разгон, торможение, изменение направления вращения, переход с одной частоты вращения на другую, переключение процесса регулирования с одного параметра на другой. О всех состояниях  $БУ$  сообщает  $УУ$  по каналам  $f_1 - f_i$ . Обратные связи  $d_1 - d_p$  необходимы для стабилизации частоты вращения и осуществления защит по току, ускорению и т. п. Эти связи схемотехнически выполнены на уровне управляемого привода. С помощью обратных связей  $e_1 - e_r$  привод получает информацию о регулируемом параметре  $ОУ$ . Если в системе управления используется цифровая вычислительная техника, данные о параметрах  $ОУ$  поступают по входным каналам  $x_{n+1} - x_m$  в  $УУ$ , где они обрабатываются в соответствии с заложенной программой, а результат обработки, преобразованный в регулирующее воздействие, поступает в  $БУ$  по выходным каналам  $c_1 - c_s$ .

В зависимости от конкретного набора связей, их параметров и типа используемого привода можно получить различные системы автоматического управления приводом. Для наиболее массовых случаев использования привода, таких как подача электродной проволоки, перемещение сварочной тележки, аппарата и других подобных, требуется регулирование и стабилизация частоты вращения, выполнение приводом команд пуска, останова и изменения направления вращения. В настоящее время круг задач, решаемых с помощью управляемого привода, непрерывно расширяется и усложняется. К таким задачам относится сварка швов с переменной разделкой, когда необходимо отслеживать и запоминать скорость сварки, траекторию и ширину разделки. Часто в механизм привода встраиваются датчики положения выходного вала, его скорости, нагрузки и т. д.

Некоторые типовые схемы управляемого электропривода, используемого в системах автоматизации сварочных установок, даны в прил. 1.

Специфической разновидностью управляемого привода является привод сварочных роботов, который должен удовлетворять следующим основным требованиям [56]: иметь высокое быстродействие; обеспечивать оптимальный закон разгона и торможения при минимальном времени переходного процесса; обладать высокой помехоустойчивостью; иметь большое отношение выходной мощности к массе подвижных частей; обеспечивать точное позиционирование и фиксацию установленных положений исполнительных механизмов.

В качестве средств автоматизации в системах управления сварочными процессами все шире используются управляемые источники питания, обучаемые механические манипуляторы, вычислительная техника. Любую задачу автоматического управления как частный случай общей проблемы обработки информации можно представить совокупностью отдельных операций, выполняемых в определенной по-

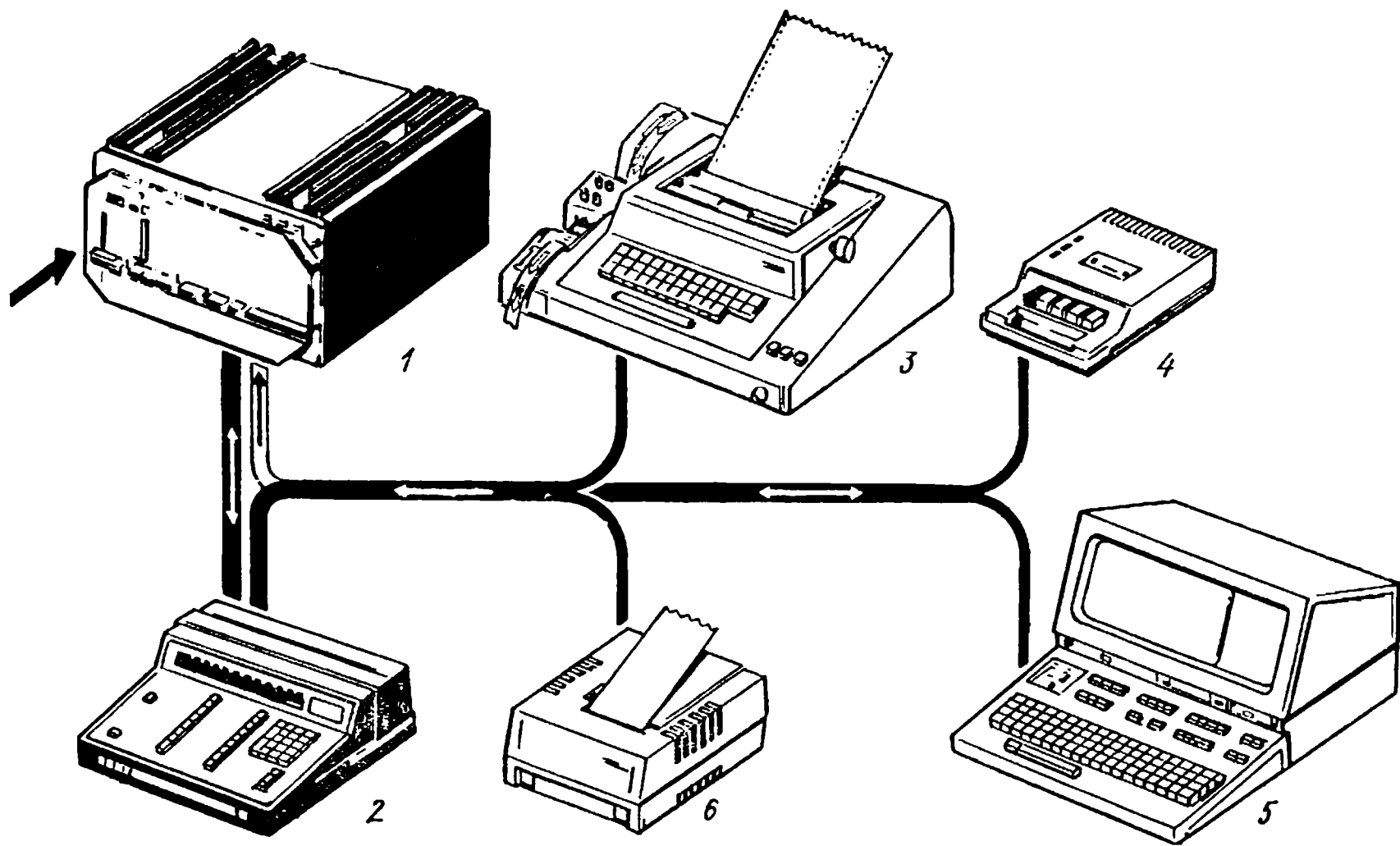


Рис. 1.10. Оконечные устройства СПСУ

следовательности. Универсальное устройство современных вычислительных систем, реализующее заданный программой процесс решения задачи — микропроцессор, выполненный на ограниченном наборе больших интегральных схем (БИС) и содержащий все основные компоненты функциональной структуры электронной вычислительной машины (ЭВМ) [35].

На основе микропроцессоров, дополненных памятью, внешними устройствами и набором средств связи, создан новый класс ЭВМ — микроЭВМ, характеризующихся малыми габаритами, массой, потребляемой мощностью; низкой стоимостью и высокой надежностью.

Если раньше ввиду значительной стоимости и сложности обслуживания универсальных управляющих вычислительных машин (УВМ) было экономически оправдано их применение в основном для группового управления несколькими технологическими установками, то теперь положение существенно меняется. Можно использовать индивидуальную микроЭВМ для управления не только одной установкой, но даже отдельными механизмами и устройствами в пределах установки. Применение микроЭВМ привело к развитию свободно программируемых систем управления (СПСУ), главной особенностью которых является модульность, что позволяет на их основе создавать системы управления самыми различными технологическими процессами, использующими разные типы технологического оборудования. Аппаратная часть систем управления на базе СПСУ складывается из отдельных модулей: центрального микропроцессора (МП), запоминающего устройства (ЗУ), в том числе постоянного ЗУ (ПЗУ), программируемого ПЗУ (ППЗУ), оперативного ЗУ (ОЗУ), модулей ввода-вывода, аналоговых, дискретных, число- и широтно-импульсных сигналов, модулей связи с пультами и пультами оператора, модулей межпроцессорной связи и др. Основным конструктивным элементом СПСУ, показанной на рис. 1.10, является

герметичный водо- и пыленепроницаемый центральный блок 1 (называемый также «корпусом системы управления»), в котором размещены все внутренние связи и коммуникации и расположен МП, обрабатывающий находящиеся в программном ЗУ команды. Через клавиатуру центрального блока можно проводить изменения программы и вводить данные, а также в любое время определять состояние управляемого оборудования и хода выполнения программы. Память команд набирается из отдельных конструктивных блоков, также вставляемых в корпус системы. В наборе модулей имеются платы ОЗУ и ППЗУ с электрической перезаписью. Для питания плат ОЗУ, а также ОЗУ, находящегося в составе блока 1, в него может быть встроена аккумуляторная батарея, обеспечивающая сохранение информации в течение нескольких недель и автоматически подзаряжаемая от блока питания.

Чтобы расширить возможности управления в СПСУ, допускается использовать несколько центральных блоков, причем связь между ними осуществляется через модули ввода-вывода.

Для подготовки программ применяется специальное программирующее устройство 2 (рис. 1.10), которое может работать независимо от системы управления, например, в конструкторском или технологическом отделе, где проектируется данный технологический процесс. Составленная программа заносится в ЗУ устройства управления либо на плате ППЗУ вставляется в корпус системы управления.

К системе управления или к программирующему блоку можно подключить ряд внешних устройств, таких как телетайп 3, кассетный магнитофон 4, дисплей 5, печатающее устройство 6. При этом программы могут быть зарегистрированы на восьмидорожечной перфоленте (телетайп), на магнитной ленте (магнитофон) и распечатаны на бумаге (печатающее устройство). Во всех отладочных режимах возможно прямое вмешательство оператора в ход выполняемой программы, ее редактирование и исправление.

При включении системы управления автоматически производится самоконтроль (тестирование) аппаратной части системы управления, а также проверка отсутствия ошибок в программе, записанной в ЗУ. В случае обнаружения ошибки система может реагировать на нее различным образом в зависимости от обнаруженной неисправности — остановкой выполнения программы, отключением входов и выходов от управляемого оборудования, мгновенным выключением управляемого оборудования, выключением системы управления.

Сообщение об ошибке, выводимое на дисплей 5, содержит код ошибки, адрес ошибочной команды и ее код либо адрес неработающего устройства, что позволяет оператору легко идентифицировать место и характер обнаруженной неисправности или ошибки. На основе современных микроЭВМ строятся информационные системы, обеспечивающие сбор, обработку, хранение и отображение по запросу оператора параметров, характеризующих сварочный процесс. Развитие таких систем позволяет осуществлять управление в режиме «советчик оператора», при котором рассчитанные ЭВМ по моделям процесса управляющие воздействия сообщаются оператору с помощью средств отображения информации.

На этой основе оператор изменяет установки регуляторов, добиваясь оптимизации процесса.

При с у п е р в и з о р н о м . у п р а в л е н и и микроЭВМ работает в составе замкнутой автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и выдает управляющие воздействия в виде, в котором их можно непосредственно использовать для изменения настройки регуляторов. Функции оператора сводятся к наблюдению и вмешательству в работу системы лишь при возникновении аварийных ситуаций.

Наиболее полно преимущества построения АСУ ТП на основе ЭВМ проявляются при непосредственном цифровом управлении. В этом случае в системе вообще отсутствуют локальные регуляторы. Сигналы, необходимые для приведения в действие исполнительных органов, непосредственно поступают от АСУ, которая рассчитывает реальные воздействия и передает в необходимой форме сигналы управления непосредственно в исполнительные органы. Для современных АСУ ТП число контуров управления может достигать нескольких сотен. В каждом контуре управления сигнал измеряемого параметра вводится в ЭВМ АСУ ТП через подсистему ввода аналоговых либо дискретных сигналов. ЭВМ по заданному алгоритму вычисляет значение управляющего воздействия и через подсистему вывода аналоговых или дискретных сигналов корректирует «положение» исполнительного органа. Таким образом, контур управления контролируется и регулируется непосредственно АСУ. Контроль и управление контурами осуществляется с заданной частотой (программный опрос) либо по запросу от контура управления. Во втором случае в АСУ может быть приоритетное обслуживание запросов контуров управления. Установки для каждого контура вводятся в АСУ оператором или ЭВМ верхнего уровня, решающей задачу оптимизации процесса.

Для общения оператора с системой непосредственного цифрового управления в состав системы вводят средства (аппаратные и программные), которые обеспечивают диалоговый режим работы. В общем случае оператор должен иметь доступ к управляющей программе.

Основным преимуществом АСУ ТП, работающей в режиме непосредственного цифрового управления, является возможность изменения алгоритмов управления простым частичным либо полным изменением хранимой программы. При этом нужно иметь в виду, что такие изменения должны быть полностью подготовлены, т. е. новая программа должна быть отлаженной и проверенной перед тем, как ее использовать в реальной системе. Несмотря на такое требование гибкость системы непосредственного цифрового управления ничем не ограничена.

Основной недостаток метода непосредственного цифрового управления: при отказе АСУ ТП дальнейшее проведение технологического процесса невозможно. Несмотря на высокую надежность современной электронной техники отказы неизбежны. Поэтому метод непосредственного цифрового управления необходимо применять в тех случаях, когда отказ АСУ не приводит к большим материальным потерям.



## 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

### 2.1. Характеристика объекта управления

Для изучения особенностей технологического процесса дуговой сварки как объекта регулирования необходимо обобщенную схему сварочного процесса (см. рис. 1.1) детализировать с учетом основных взаимосвязей, присущих рассматриваемому способу сварки (рис. 2.1). Здесь можно выделить два внутренних замкнутых контура регулирования. посредством контура I, охватывающего источник питания, плавящийся электрод и дугу, реализуется процесс саморегулирования электрода. Контур II охватывает сварной шов, электрод, дугу и отражает влияние прогиба свободной поверхности сварочной ванны и глубины проплавления на длину дуги.

Конечным элементом схемы является сварной шов, геометрические размеры которого — глубина проплавления  $H$ , ширина  $B$ , усиление  $A$ , — наряду с химическим составом и структурой, определяют эксплуатационные свойства сварного соединения. В реальных условиях каждый из элементов, представленных в обобщенной схеме, функционирует в условиях возмущений, что приводит к отклонениям размеров сварного шва от установленных значений и появлению дефектов: непроваров, подрезов, наплывов и др. Наибольший практический интерес представляет изучение влияния на сварной шов следующих основных групп возмущений.

Возмущения по параметрам режима сварки непосредственно влияют на процессы плавления основного и электродного металлов и их соотношение в металле шва. Так, глубина проплавления связана со сварочным током зависимостью:

$$H = k_{\text{пр}} I_{\text{д}}$$

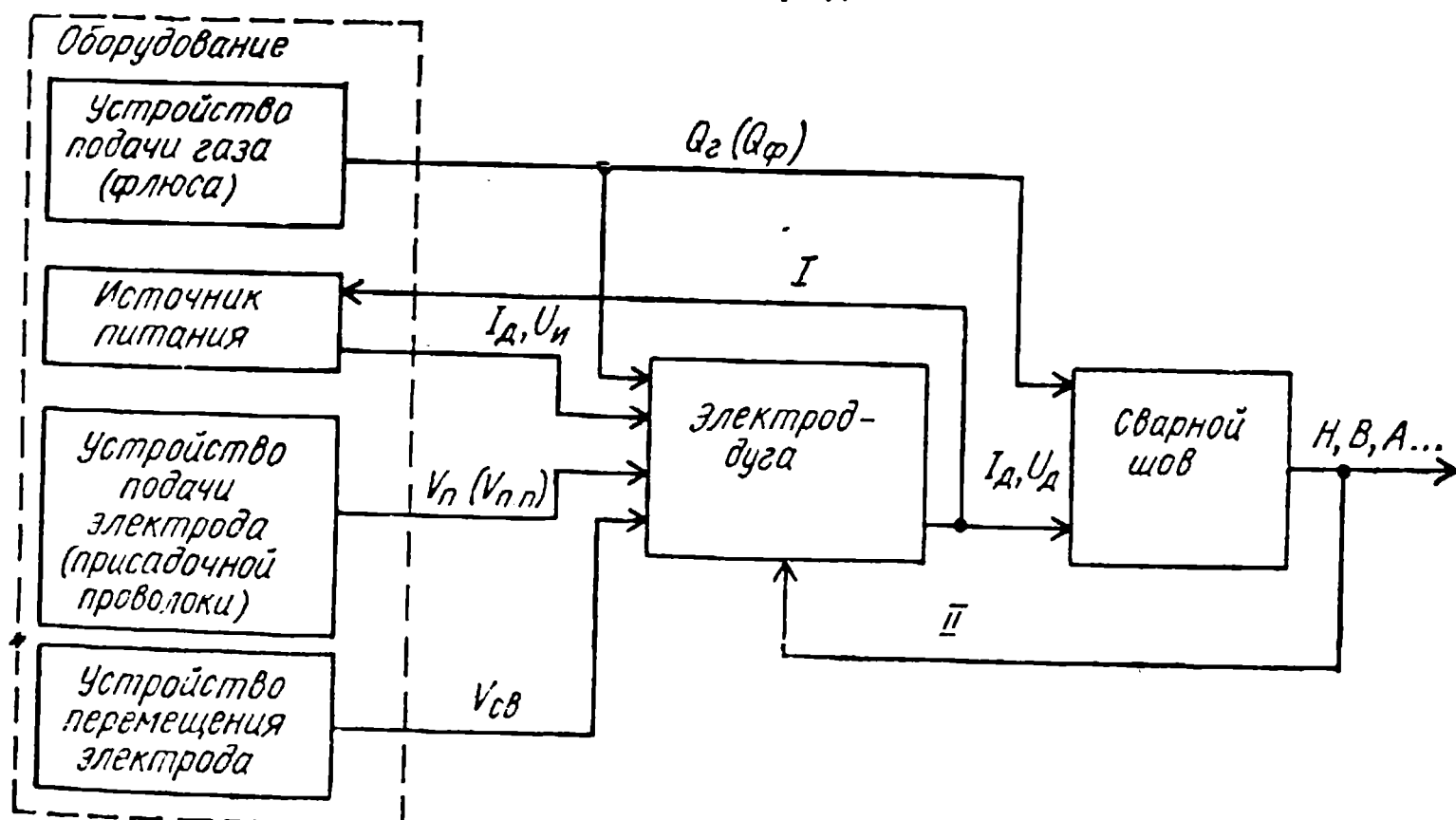


Рис. 2.1. Функциональная схема контура дуговой сварки



где  $k_{пр}$  — коэффициент пропорциональности, определяемый полярностью и плотностью тока, скоростью сварки, плотностью металла, составом защитной среды и т. д. С увеличением тока возрастает не только глубина проплавления, но и доля основного металла в металле шва.

Возмущения по напряжению дуги влияют на ширину и долю основного металла и являются одной из причин образования подрезов при сварке угловых швов.

Изменения скорости сварки сложным образом влияют на форму сварного шва. При малых скоростях (10 м/ч при сварке под флюсом) вследствие снижения интенсивности вытеснения расплава из-под столба дуги величина проплавления минимальна. С увеличением скорости сварки до 25 м/ч проплавление увеличивается, а затем из-за снижения погонной энергии — уменьшается. Таким образом, в зависимости от установленной скорости сварки ее изменения могут быть связаны с изменениями глубины проплавления как прямой, так и обратной зависимости. Ширина шва связана со скоростью сварки обратной зависимостью.

Изменения вылета электрода, особенно при сварке электродной проволокой малого диаметра, существенно влияют на форму шва. Это обусловлено тем, что изменения вылета электрода существенно влияют на производительность его расплавления, в результате чего изменяется ток, а следовательно, и глубина проплавления  $H$ . С увеличением вылета  $H$  уменьшается.

Нарушение условий газовой защиты оказывает влияние на форму и качество сварного шва. Возникновение турбулентности газовой струи и подсос воздуха в зону сварки вследствие отклонений расхода защитного газа, изменения расстояния между горелкой и сварочной ванной, сквозняков и т. д. приводят к нарушению устойчивости процесса и образованию дефектов в сварных швах.

*Технологические возмущения*, обусловленные нарушениями технологии подготовки и сборки изделий под сварку, во многих случаях являются основной причиной отклонений от заданных размеров сварных швов и появления в них опасных дефектов. Так, наличие ржавчины, влаги, масла, краски и других водородосодержащих веществ на свариваемых поверхностях, а также повышенное содержание влаги во флюсе, защитном газе приводят к образованию пор в сварном шве. При увеличенном зазоре между свариваемыми кромками при сварке под флюсом на флюсовой подкладке в сварном шве первого прохода часто возникает заполненная шлаком несплошность, так называемый шлаковый канал. Повышенный зазор в стыке приводит к образованию таких опасных дефектов, как провисание шва и прожог. Сборка заготовок с превышением кромок приводит к образованию наплывов и непровару корня шва.

Не менее важное условие получения качественных сварных соединений — обеспечение точного расположения электрода по отношению к свариваемым кромкам или слою (при многопроходной сварке). Следствием неточного направления дуги по оси соединения являются непровары и подрезы в сварном шве.

Непрерывно возрастающие требования к качеству сварных соединений могут быть удовлетворены лишь на основе использования си-

ством автоматического управления (САУ) процессом дуговой сварки, которые выполняют следующие функции:

программное управление перемещениями рабочих органов сварочного оборудования;

управление последовательностью операций — системы программного управления сварочными циклами;

стабилизацию режима сварки, обеспечивающую исключение влияния на сварной шов возмущений по току и напряжению дуги, скорости сварки, вылету электрода, длине дуги, расходу защитного газа и др.;

автоматизацию направления электрода по оси сварного соединения с помощью следящих систем;

компенсацию отдельных технологических возмущений. Например, посредством введения присадочной проволоки без дополнительного вложения энергии удастся компенсировать, в ограниченных пределах, увеличение площади разделки кромок;

управление переносом металла, формированием и кристаллизацией сварных швов.

В последнее время разрабатываются системы, осуществляющие автоматическое управление с использованием математических моделей процесса образования сварного соединения с учетом некоторых технологических возмущений. Однако на современном уровне развития сварочной техники невозможно компенсировать некоторые технологические возмущения, например: изменение химического состава основного и присадочного материалов, защитной среды; изменения условий отвода тепла от области образования шва при переменной геометрии изделия и т. д.

В зависимости от цели управления применяют различные САУ дуговой сваркой.

## **2.2. Программное управление перемещениями рабочих органов сварочного оборудования**

Положение рабочих органов сварочного оборудования определяется координатами звеньев манипуляционных систем. В зависимости от характера управления СПУ перемещениями могут быть разделены на *позиционные* и *контурные* (рис. 2.2). Первые обеспечивают последовательное позиционирование с необходимой точностью рабочего органа из одной точки пространства в другую. Позиционные системы могут быть двух разновидностей: 1) для управления положением сварочного инструмента относительно изделия без жесткой регламентации траектории перемещения между точками; 2) для управления движения по траектории, участки которой повторяют форму направляющих.

Позиционные СПУ координатами звеньев применяются для автоматизации следующих технологических операций: сварки электрозаклепками, дуговой приварки шпилек и бобышек, вварки труб в трубные доски, многопроходной сварки (для раскладки валиков наплавленного металла по сечению разделки) и т. д.

Контурные СПУ применяются для обеспечения движения с заданной контурной скоростью в любой точке траектории (сварка криволинейных и пространственных швов, наплавка сложных поверхностей,

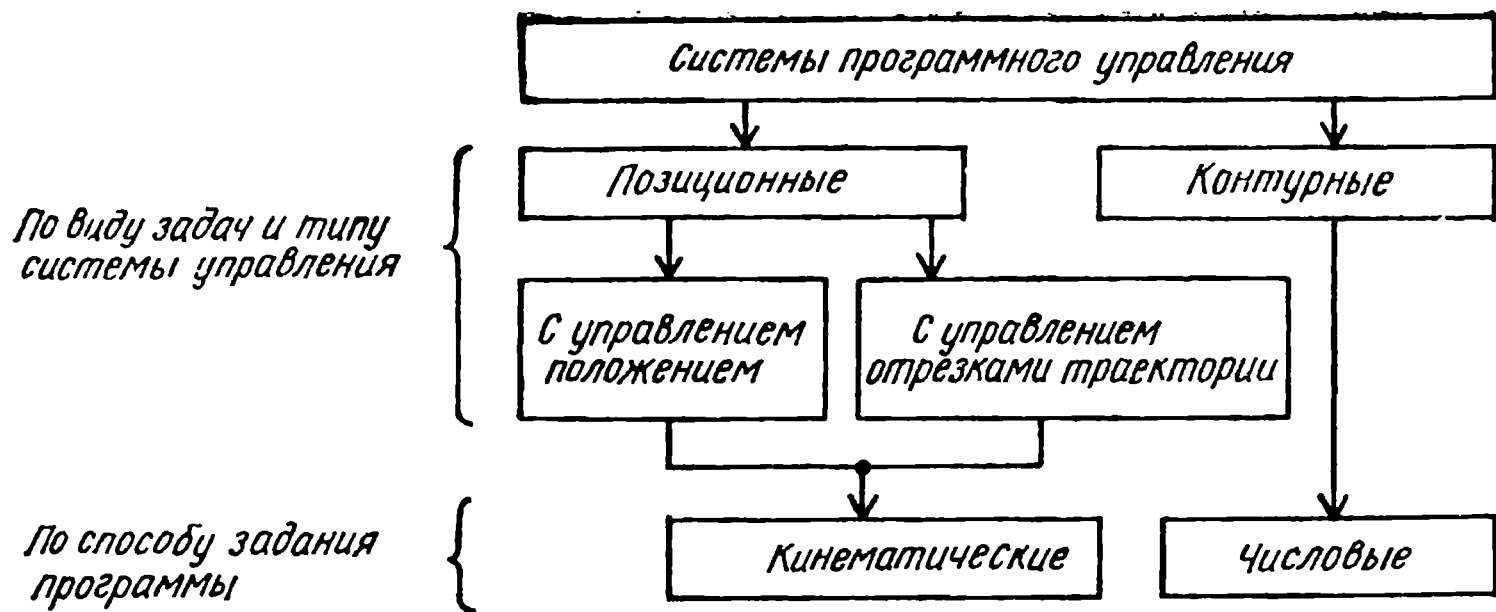


Рис. 2.2. Классификация систем программного управления координатами звеньев манипуляционных систем сварочного оборудования

термическая резка и т. д.). Контурные системы сложнее позиционных, но они могут использоваться для контурного и позиционного управления.

По способу задания и обработки программы, а также виду применяемых технических средств СПУ перемещениями рабочих органов сварочного оборудования их целесообразно разделить на *кинематические* и *числовые*.

**Системы кинематического программного управления** (рис. 2.3.). Характерной особенностью систем этого типа является задание величины и траектории перемещений в виде сменяемых или перенастраиваемых геометрических аналогов (моделей).

*Позиционные системы кинематического управления с постоянным циклом* предусматривают изменение программы лишь для величин управляемых координат и не предусматривают возможности измене-

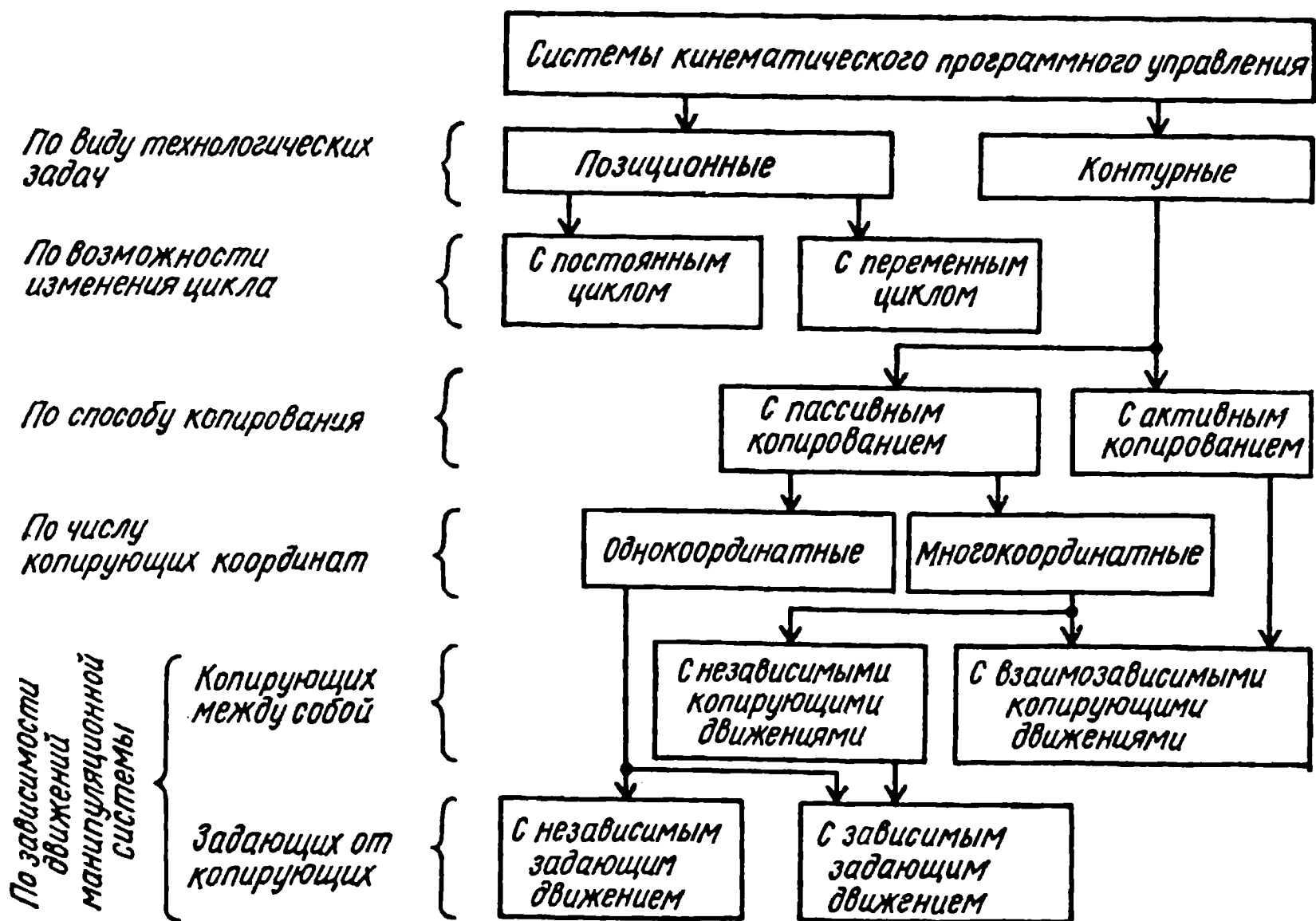


Рис. 2.3. Классификация систем кинематического программного управления координатами звеньев манипуляционных систем оборудования для дуговой сварки и наплавки

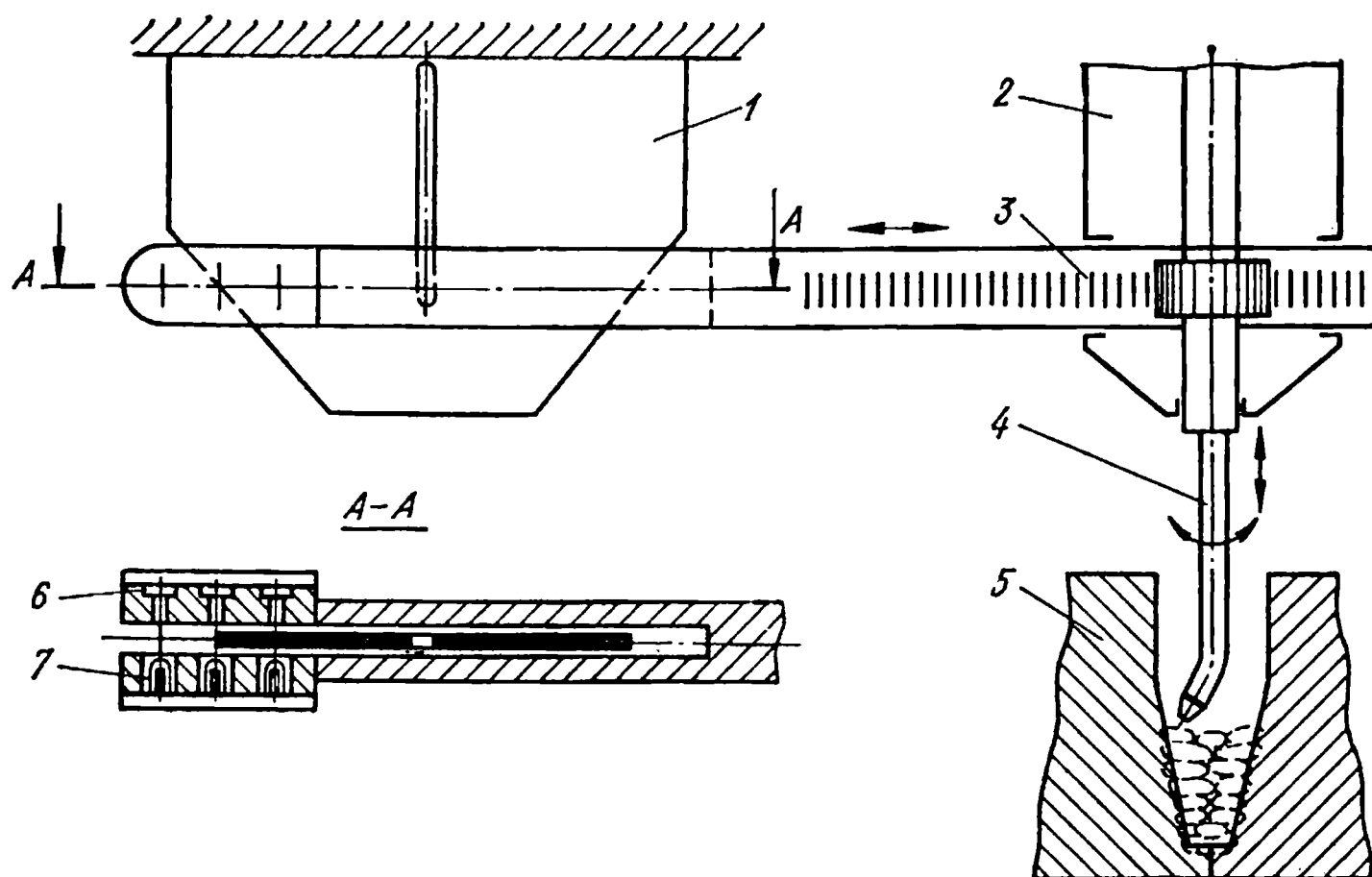


Рис. 2.4. Принцип считывания программы в системе циклового управления многослойной дуговой сваркой:

1 — маска-программоноситель; 2 — сварочный аппарат; 3 — шток; 4 — поворотный мундштук; 5 — свариваемое изделие; 6 — фотоприемники; 7 — осветитель фотоприемников

ния последовательности работы исполнительных элементов, которая определяется неперестраиваемой частью системы управления. Эти системы применяются при сварке ряда исполнений одного изделия, отличающихся расстояниями между точками или линиями сварки, или различными длинами швов, но свариваемые в неизменной последовательности, например, при многослойной дуговой сварке в узких и глубоких зазорах или разделках неизменной ширины в два или три прохода в слое [37].

Позиционные системы кинематического управления с переменным циклом предусматривают изменение по заданной программе величин управляемых координат и последовательности действия исполнительных элементов. Такие системы обычно называют системами циклового программного управления (ЦПУ). В простых системах ЦПУ последовательность элементов цикла задается на штеккерных панелях, наборах переключателей, диодных матрицах, а величины перемещений — положением путевых выключателей, что снижает функциональную гибкость оборудования. Система ЦПУ, в которой положение и сочетание задающих путевых элементов определяют как величину перемещений, так и последовательность работы отдельных приводов, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР [52] применительно к многослойной сварке кольцевых швов, показана на рис. 2.4. Перемещение по горизонтали осуществляется поворотом изогнутого мундштука, а по вертикали — подъемом штанги сварочного аппарата.

Блок ввода программы состоит из штока со считывающей головкой и маски-программоносителя. В процессе заполнения разделки программноноситель неподвижен, а шток со считывающей головкой перемещается по вертикали вместе со штангой сварочного аппарата и мундштуком. Одновременно ему сообщается горизонтальное перемещение от привода поворота мундштука. Для увеличения точности отработки

Фотоприемник			Содержание команд (последовательность действий исполнительных устройств)
левый	средний	правый	
+	+	—	Мундштук в крайнем левом положении. Отключение поворота мундштука. Наложение кольцевого валика у левой стенки разделки. Подъем штанги сварочного аппарата (по времени). Наложение кольцевого валика у левой стенки разделки. Включение поворота мундштука вправо.
—	+	—	Мундштук в очередном из средних положений. Отключение поворота мундштука. Наложение кольцевого валика. Включение поворота мундштука в том же направлении, в котором он поворачивался до наложения указанного кольцевого валика.
—	+	+	Мундштук в крайнем правом положении. Отключение поворота мундштука. Наложение кольцевого валика у правой стенки разделки. Подъем штанги сварочного аппарата (по времени). Наложение кольцевого валика у правой стенки разделки. Включение поворота мундштука влево.
+	—	—	—
—	—	+	—
+	+	+	Аварийный стоп

Примечание. + освещен; — не освещен.

программы горизонтальное перемещение считывающей головки в несколько раз больше соответствующего перемещения конца электродной проволоки поперек разделки.

Считывающая головка состоит из трех осветителей и трех фотоприемников, охватывающих непрозрачную маску-программонеситель и расположенных в ряд по горизонтали. Конфигурация боковых кромок маски определяется контуром боковых стенок разделки. Количество вертикальных прорезей в маске зависит от ширины разделки и равно числу валиков наплавленного металла в одном слое минус два. Каждая вертикальная прорезь маски позволяет одновременно осветить только один из трех фотоприемников считывающей головки, и лишь за пределами боковых кромок маски возможна засветка двух фотоприемников. Содержание команд, получаемых от считывающей головки, приведено в табл. 2.1.

*Контурные системы кинематического программного управления* основаны на применении таких технических средств автоматического копирования (шаблонов, кулачков, копиров), контуры которых представляют собой геометрические аналоги (модели) требуемых траекторий перемещения.

Системы с пассивным копированием характеризуются тем, что щуп соприкасается с шаблоном под действием пружин, сжатого воздуха, давления рабочей жидкости, сил тяжести или приводов отдельных звеньев манипуляционной системы. При этом копирование может осуществляться системами прямого действия, в которых сварочный ин-

струмент жестко связан со щупом, и системами непрямого действия, в которых сварочный инструмент жестко связан с корпусом датчика положения шаблона. Перемещения сварочного инструмента в направлении копирования осуществляются приводом, управляемым от датчика через регулятор и усилитель мощности. В системах непрямого действия, копирующих шаблоны, чаще всего применяются фотоэлектрические датчики, а в качестве программносителя — чертежи, фотошаблоны или непрозрачные маски [3]. Такие системы широко применяются в оборудовании для термической резки.

Для автоматизации перемещений при наплавке тел вращения применяются однокоординатные системы прямого и непрямого копирования (см. прил. 2).

Многокоординатные системы с пассивным копированием в отличие от однокоординатных имеют два или более копирующих движения, которые могут быть независимыми между собой или взаимозависимыми.

Многокоординатные системы с независимыми копирующими движениями представляют собой комбинацию двух (в редких случаях — более) однокоординатных систем. Обычно такие системы применяются для управления движением по нестрого ориентированным траекториям и по траекториям, для которых вектор контурной скорости поворачивается в пределах  $90^\circ$  (системы с зависимым задающим движением).

Многокоординатные системы с независимыми копирующими движениями применяются также при сварке швов сложной формы с изменением направления вектора контурной скорости в пределах, больших, чем  $90^\circ$  (вплоть до  $360^\circ$ ), если общая величина перемещений по каждой из координат невелика (до 100—150 мм). В этом случае требуемый закон изменения каждой из координат может быть задан отдельным кулачком, а суммарное движение по заданной траектории обеспечивается синхронным вращением или перемещением всех кулачков со скоростью, пропорциональной требуемой величине контурной скорости  $V_{\text{конт}}$ .

Для профилирования кулачков необходимо найти зависимости текущих значений отдельных координат от текущей длины отработанной траектории (рис. 2.5). Сущность расчета этой зависимости состоит в том, что на траектории сварочного движения задают опорные точки (рис. 2.5,а), число и расположение которых определяется кривизной траектории, а также способом и допустимой погрешностью интерполяции.

Расстояние  $\Delta l_{i+1}$  между любыми соседними опорными точками вдоль траектории сварочного движения при линейной интерполяции можно определить из соотношения

$$\begin{aligned} \Delta l_{i+1} &= l_{i+1} - l_i = \\ &= \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}. \end{aligned}$$

Определив  $\Delta l_{i+1}$  для всех участков траектории, легко построить графики, приведенные на рис. 2.5,б, которые являются исходными для профилирования кулачков. Поскольку с увеличением размеров рабочей зоны кулачковые механизмы становятся громоздкими, такие решения приемлемы только при сварке швов малых размеров. По той



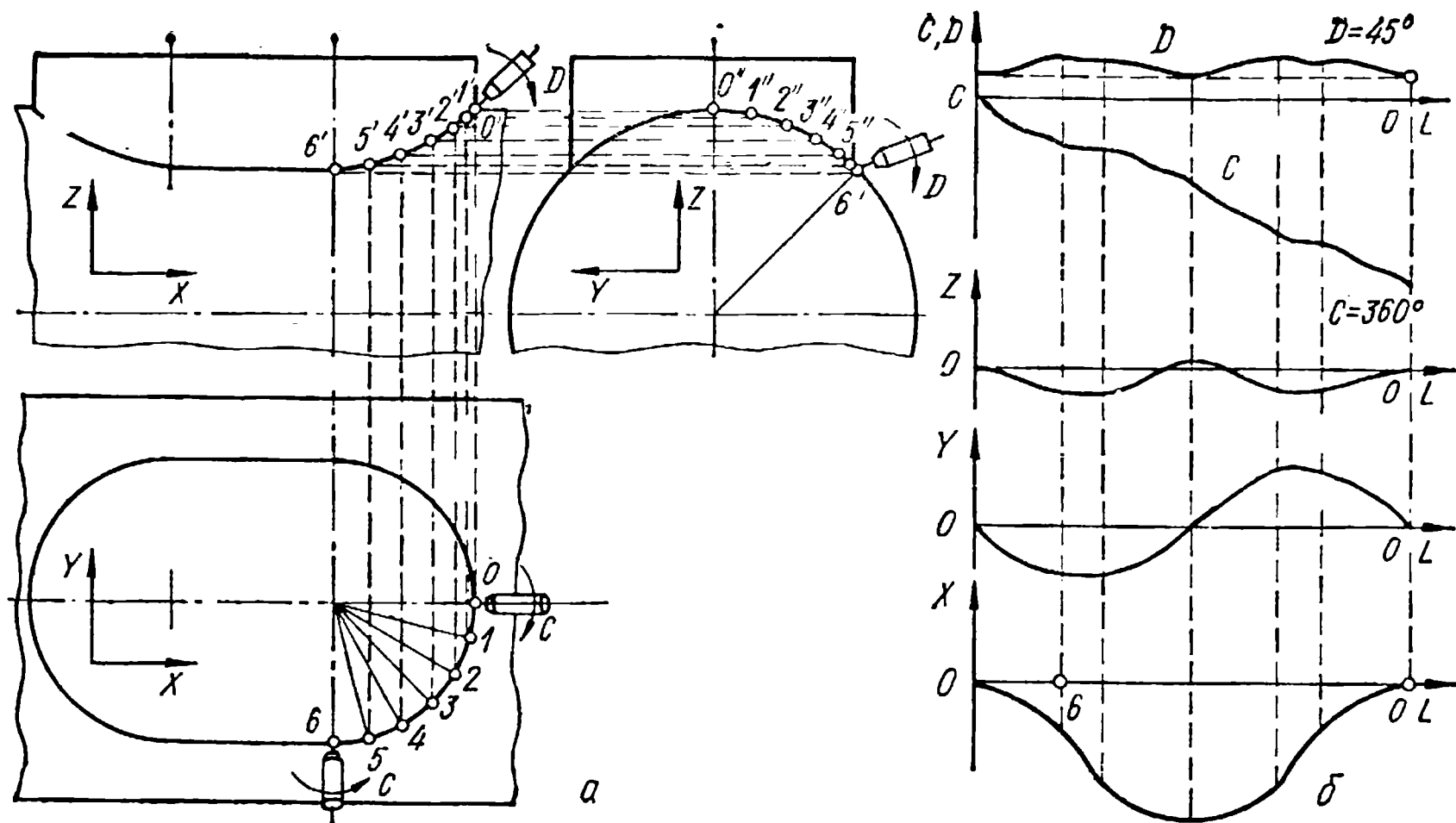


Рис. 2.5. Зависимости текущих значений координат от текущей длины отработанной траектории в многокоординатных системах с независимыми копирующими движениями для сварки коротких замкнутых швов

же причине манипуляционные системы, управляемые таким способом, должны иметь переносные движения, не зависящие от ориентирующих.

Синхронное и синфазное движение (вращение) всех кулачков может быть обеспечено жесткой кинематической цепью или электрическим валом — синхронной следящей системой.

Если в конце цикла значения каких-либо координат не будут равны исходным (на рис. 2.5 — координата  $D$ ), необходим обратный ход кулачковых механизмов только этих координат или общий обратный ход всех кулачковых механизмов.

Многокоординатные системы с взаимозависимыми копирующими движениями (с пассивным копированием) могут быть только непрямого действия. Они обеспечивают автоматическое копирование в пределах полного оборота вектора контурной скорости. Чтобы обеспечить постоянство модуля контурной скорости, в этих системах применяют различного типа синусно-косинусные распределители (преобразователи), на вход которых подается величина, пропорциональная  $V_{\text{конт}}$ , а с выходов снимаются величины, пропорциональные скоростям взаимосвязанных копирующих движений. Для двухкоординатной системы  $v_x = V_{\text{конт}} \cos \alpha$ , а  $v_y = V_{\text{конт}} \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона контура, отсчитываемый от положительного направления сси  $X$  в сторону положительного направления оси  $Y$ . В частности, двухкоординатные фотоэлектрические системы с взаимозависимыми движениями [3], осуществляющие автоматическое копирование по чертежу, широко используются в машинах для термической резки.

Системы с активным копированием шаблонов широко применяются для автоматизации термической резки и сварки плоских замкнутых швов сложной формы. В этих системах копирование шаблона осуществляется путем его обкатки приводным роликом — щупом. Кинематическая связь приводного ролика с шаблоном выполняется либо за счет сил трения, обеспечиваемых пружинным или электромагнитным

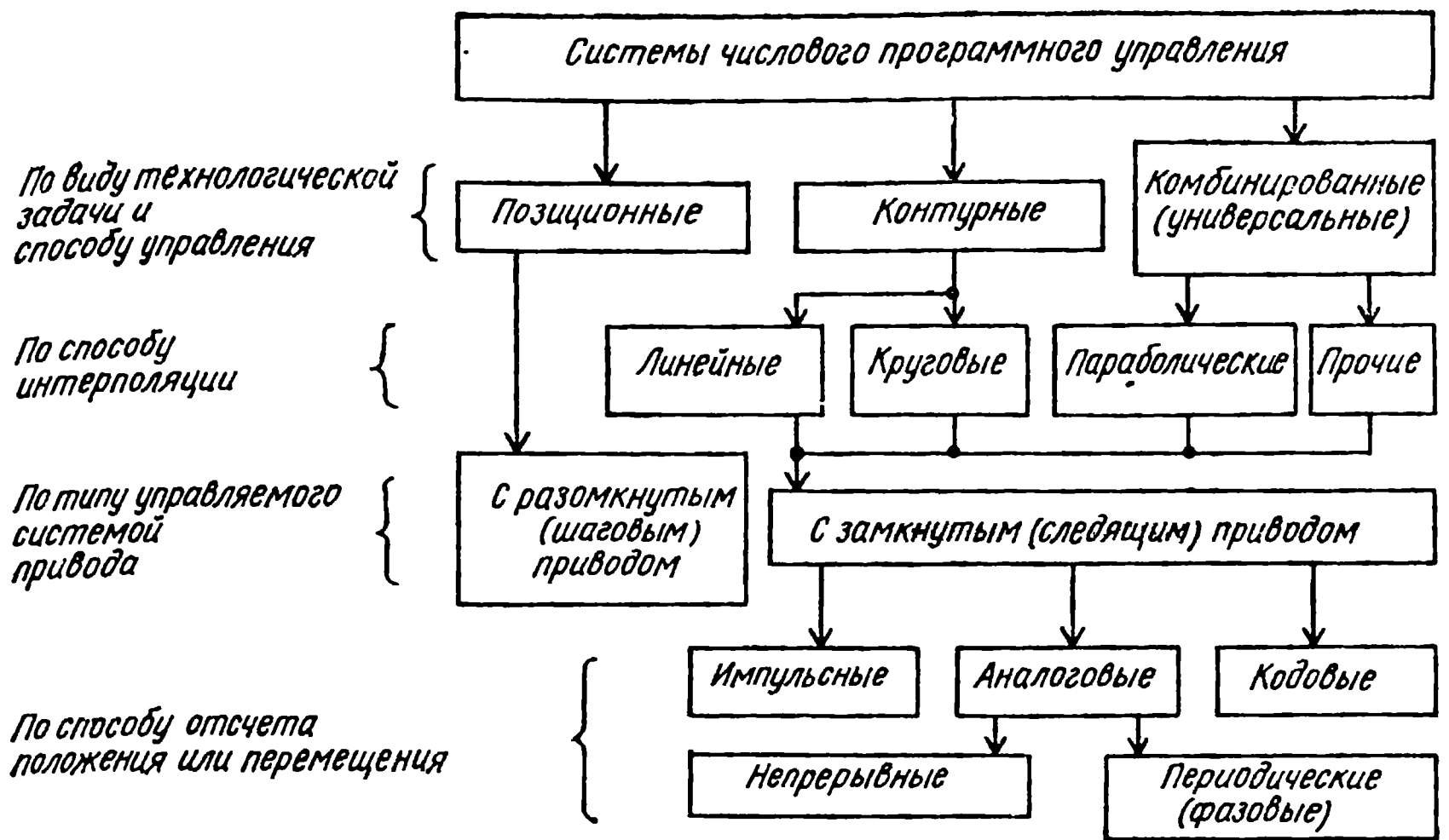


Рис. 2.6. Классификация систем ЧПУ координатами звеньев манипуляционных систем оборудования для дуговой сварки

прижимом ролика к шаблону, либо путем применения зубчатой или цевочной передачи. Изделие крепится неподвижно относительно шаблона. Движение вдоль заданного контура осуществляется либо за счет перемещения (вращения) изделия с шаблоном, либо за счет перемещения сварочного инструмента относительно неподвижных шаблона и изделия, либо при одновременном движении изделия и инструмента.

Системы с активным копированием применяются в крупносерийном и массовом производстве сварных конструкций емкостей (цистерн, канистр и т. п.) с сечением в виде эллипса, прямоугольника с закруглениями углов и других форм.

**Системы числового программного управления (ЧПУ).** Характерной особенностью систем этого типа является представление информации о величинах и траекториях перемещений, а также о параметрах режимов в алфавитно-цифровом виде, а переработка этой информации осуществляется с применением методов и технических средств вычислительной техники. Системы ЧПУ — наиболее гибкое средство автоматизации манипуляционных систем технологического оборудования в целом, в том числе сварочного. Классификация систем ЧПУ для сварки и наплавки приведена на рис. 2.6.

Подготовка программы для позиционных систем состоит в определении приращения координат, которые необходимо отработать при переходе в каждую последовательную позицию, или абсолютных значений координат этой позиции (в зависимости от типа системы). При большом числе программируемых позиций в качестве программноносителя обычно применяют перфоленту, изредка — массивы перфокарт, магнитные диски, ленты, барабаны, а при небольшом числе позиций — одну (иногда специальную) перфокарту, перфодиск, штеккерные панели (стационарные и сменные), диодные матрицы, блоки тумблеров и многопозиционных переключателей. Современные позиционные устройства ЧПУ имеют оперативную память на всю программу.

Программа вводится в оперативную память с перфоленты или другого носителя один раз, после чего перфолента не используется при обработке данной партии изделий.

Подробное описание разновидностей позиционных систем ЧПУ, их структур, устройств ввода программы можно найти в работе [47].

Контурные системы ЧПУ являются более сложными, но вместе с тем более гибкими и универсальными. В настоящее время в зависимости от применяемых средств задания программы, типа привода, элементной базы и структуры устройств ЧПУ различают четыре поколения контурных систем ЧПУ.

*Первое поколение* контурных систем характеризуется: вводом программы на магнитной ленте в унитарном коде или в виде фазомодулированного сигнала (интерполятор не встроен в устройство ЧПУ, размещаемое рядом с оборудованием); применением электрогидравлического шагового привода с наибольшей частотой вращения 800—1000 Гц или следящего привода (электрогидравлического и электрического постоянного тока); использованием в качестве элементной базы полупроводниковых элементов; постоянством структуры устройств ЧПУ.

Для *второго поколения* систем характерно: задание программы на пятидорожечной перфоленте, например, в коде БЦК-5 (интерполятор, встроенный в устройство ЧПУ); применение такого же привода, как и в первом поколении, но с повышенными показателями качества, регулирования; использование в качестве элементной базы полупроводниковых элементов с малой степенью интеграции; постоянство структуры устройств ЧПУ с введением коррекций и стандартных циклов.

*Третье поколение*, развивающееся с середины 70-х годов, отличается: заданием программы на восьмидорожечной ленте в коде ISO; применение высокочастотных электрогидравлических шаговых приводов (до 16 кГц) и следящих приводов; использование в качестве элементной базы интегральных схем со средней степенью интеграции; постоянство структуры устройств ЧПУ с возможностью изменения алгоритмов работы при замене плат постоянного запоминающего устройства.

*Четвертое поколение* отличается от третьего широким использованием: каналов связи для ввода программы, переносных блоков электронной памяти, гибких магнитных дисков, магнитных мини-кассет; электрического следящего привода с высокомоментными двигателями; интегральных схем с большой степенью интеграции, микропроцессоров, оперативной памяти для всей программы, архитектуры системы по типу микроЭВМ.

Подготовка программы перемещений для контурных систем ЧПУ основана на аналитическом определении координат характерных точек траектории, указании типа кривой, характера и скорости движения. Такой способ подготовки программы обычно называют внешним программированием.

В сварочном производстве применяют серийно выпускаемые общепромышленные устройства ЧПУ, что позволяет:

исключить разработку дополнительных устройств ЧПУ и их модификаций, предназначенных для сварочных операций;

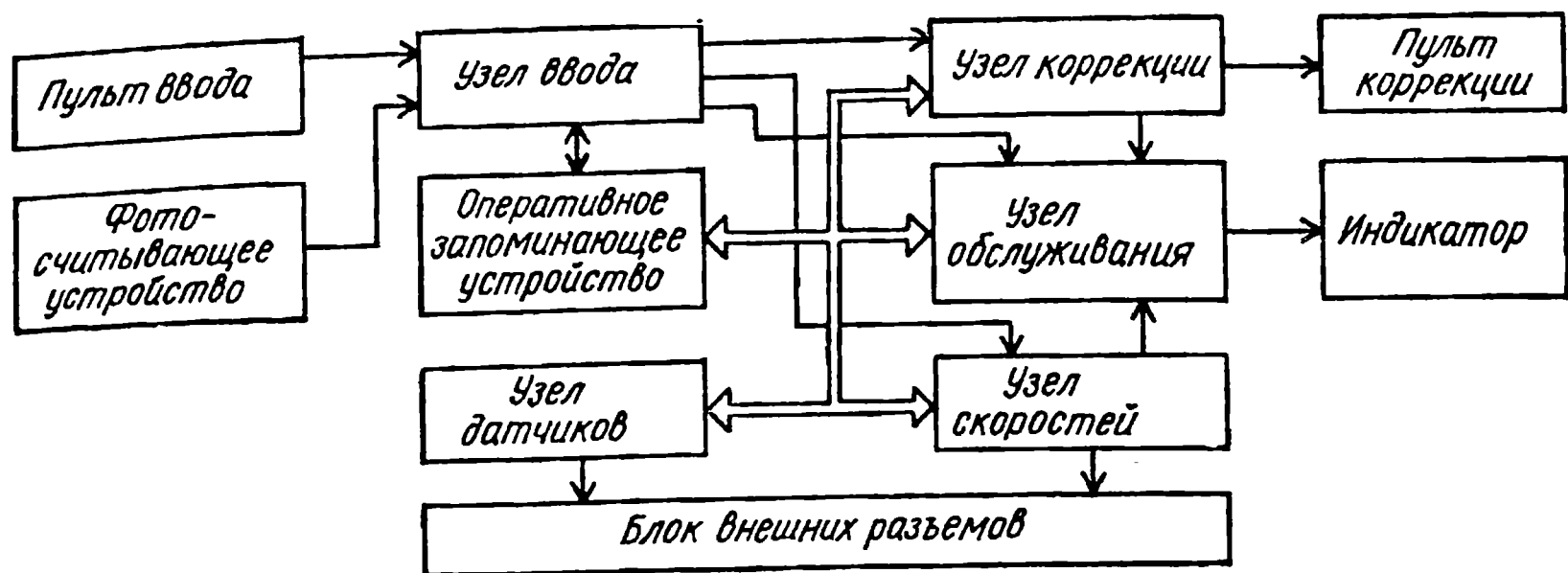


Рис. 2.7. Структурная схема устройства ЧПУ «Размер 2М»

использовать серийные, относительно недорогие устройства ЧПУ, освоенные эксплуатационными службами предприятий и обеспеченные централизованным сервисом и запчастями;

упростить в целом процесс внедрения сварочного оборудования с ЧПУ.

Вместе с тем такой подход к использованию ЧПУ имеет ряд недостатков:

1) избыточность серийных устройств ЧПУ (например, по достижимой точности отработки, количеству вспомогательных команд) и их недостаточность в некоторых случаях по числу управляемых подвижностей и возможности свободного управления параметрами процесса сварки;

2) ограниченные возможности устройств ЧПУ, выпускаемых для автоматизации обработки резанием, по наращиванию системы управления средствами геометрической и технологической адаптации;

3) языковые средства устройств управления другими технологическими процессами иногда не являются оптимальными для устройств управления сварочными процессами.

Оптимальной является такая последовательность использования систем ЧПУ, при которой разработка средств автоматизации сварочного производства предусматривает максимальное использование серийных устройств ЧПУ (с необходимой доработкой) и одновременно осуществление перспективных разработок по созданию методов и технических средств, наиболее подходящих для автоматизации процессов сварки.

Для задач, связанных с управлением последовательными положениями рабочих органов сварочного оборудования, используют позиционные устройства ПУ. Как показал опыт, высокой надежностью в условиях сварочного производства обладает устройство ЧПУ «Размер 2М» (рис. 2.7). Устройство состоит из ряда функционально и конструктивно законченных частей — узлов.

*Узел ввода (УВ)* предназначен для ввода программы и управления работой устройства.

*Пульт ввода*, являющийся частью узла ввода, предназначен для выбора способа задания программы (ручной ввод или ввод с ленты), режима отработки программы (автоматической и полуавтоматической) и выдачи команды «Пуск» программы. При ручном вводе программа

набирается на поле задания пульта ввода. При вводе программы с перфоленты узел ввода управляет *фотосчитывающим устройством*, при этом обеспечивается покадровое считывание информации. Независимо от способа задания программы исходная информация выдается из узла ввода в виде последовательного кода ISO (7/bit) и поступает в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Предусмотрено четыре полуавтоматических режима работы устройства, которые отличаются размером автоматически обрабатываемых частей программы:

- 1)  $\Delta$  — режим отработки программы по частям автоцикла;
- 2) ПС — режим покадровой отработки программы;
- 3) режим отработки программы до выбранного по номеру кадра  $N$ ;
- 4) режим отработки программы до кадра с командой MOI.

В ОЗУ код 7/bit контролируется по четности и преобразуется в код 1—2—4—8—К (код устройства или код СПУ), который распределяется по соответствующим регистрам ОЗУ. Если во входном коде обнаружена ошибка, то ОЗУ выдает в УВ сигнал «Запрет ввода», при котором запрещается дальнейший ввод и отработка программы. Информация, хранящаяся в ОЗУ, выдается кодом СПУ на кодовые шины устройства.

Время выдачи информации на кодовые шины определяется по синхросигналам, которые поступают из *узла обслуживания (ОУ)*. Узел обслуживания выдает синхросигналы, осуществляет контроль кода СПУ на шинах устройства по четности, производит операции вычислений и сравнения кода и управляет разверткой электронно-лучевого индикатора. На индикатор выводится до 160 символов, что обеспечивает оперативный контроль положения рабочего органа, индикацию вспомогательной информации и ошибок отработки положения.

*Узел коррекции* предназначен для установки начала отсчета положения механизмов станка и учета размеров инструмента.

В *узле датчиков (УД)* сигналы от датчиков положения преобразуются в код, соответствующий фактическому положению механизмов относительно абсолютного нуля (в устройствах с сельсинными датчиками) или относительно нуля, устанавливаемого в регистрах узла датчиков при включении питания (в устройствах с импульсными датчиками). Информация из УД выдается на кодовые шины устройства поразрядно в коде СПУ.

В *узле скоростей* из информации, поступающей по кодовым шинам устройства и из УО, выделяются: сигналы выбора механизмов; сигналы скоростей и направления перемещения механизмов; команды группы М.

*Блок внешних разъемов* предназначен для связи между устройством и станком.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР устройство ЧПУ «Размер 2М» применено для управления установкой для дуговой приварки круглых бобышек к листам и для контактной точечной сварки клещами листовых конструкций. В обоих случаях сварочный инструмент перемещают с помощью двухкоординатного манипулятора в плоскости  $X—Y$  относительно неподвижного изделия. Принцип числового управления позволяет программировать обход точек позиционирования в любом заданном порядке для минимизации пути



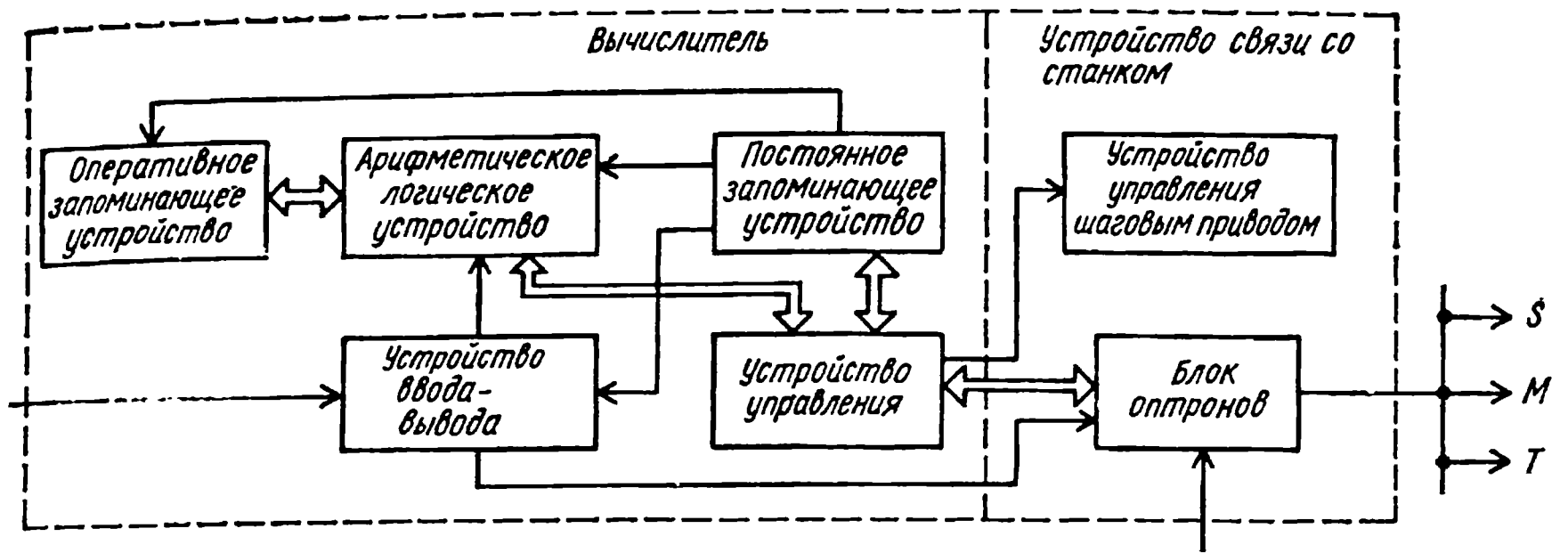


Рис. 2.8. Структурная схема устройства ЧПУ Н55-1М

и времени перемещения либо для минимизации остаточных деформаций изделия, возникающих в результате сварки.

ЧПУ «Размер 2М» имеет модификации для работы с фотоэлектрическим датчиком положения и с сельсинными датчиками. Последние имеют большие габариты и конструктивно сложнее, но обеспечивают высокую помехоустойчивость системы.

Для управления движением по траекториям сложной формы (дуговая и электронно-лучевая сварка) можно использовать контурные устройства ЧПУ. Например, устройство ЧПУ Н55, которое обеспечивает одновременное управление перемещениями по пяти координатам, может использоваться для управления сваркой швов сложной формы и наплавкой сложных кромок, поверхностей. Устройство ЧПУ (УЧПУ) Н55 выпускают в двух модификациях: Н55-1М — для шагового привода; Н55-2М — для следящего привода. Структурная схема устройства Н55-1М приведена на рис. 2.8.

Устройство управления (УУ) предназначено для управления, синхронизации и контроля отдельных блоков УЧПУ. Структурная схема УУ включает:

схему приема и дешифрации микрокоманд (МК) из устройства памяти МК (УПМК);

генератор тактов, включающий задающий генератор, схему выработки тактов, синхронизатор, схему останова по адресу, схему формирования сигнала ошибки, схему установки исходного состояния; формирователь регистра адреса МК;

пульты оператора коррекции и настройки;

АЛУ — арифметико-логическое устройство, предназначенное для выполнения арифметических и логических операций над входной информацией, поступающей из блоков УВВ, ПОЗУ, УПМК и с пультов АЛУ;

ПОЗУ — полупроводниковое оперативное запоминающее устройство, обеспечивающее хранение информации емкостью 128 слов по 26 разрядов, время выборки 0,4 мкс, а время обращения — 1 мкс;

УВВ — устройство ввода-вывода, предназначенное для ввода в УЧПУ информации с восьмидорожечной перфоленты и вывода информации на блок индикации и через блок оптронов (БО) на сварочную установку;

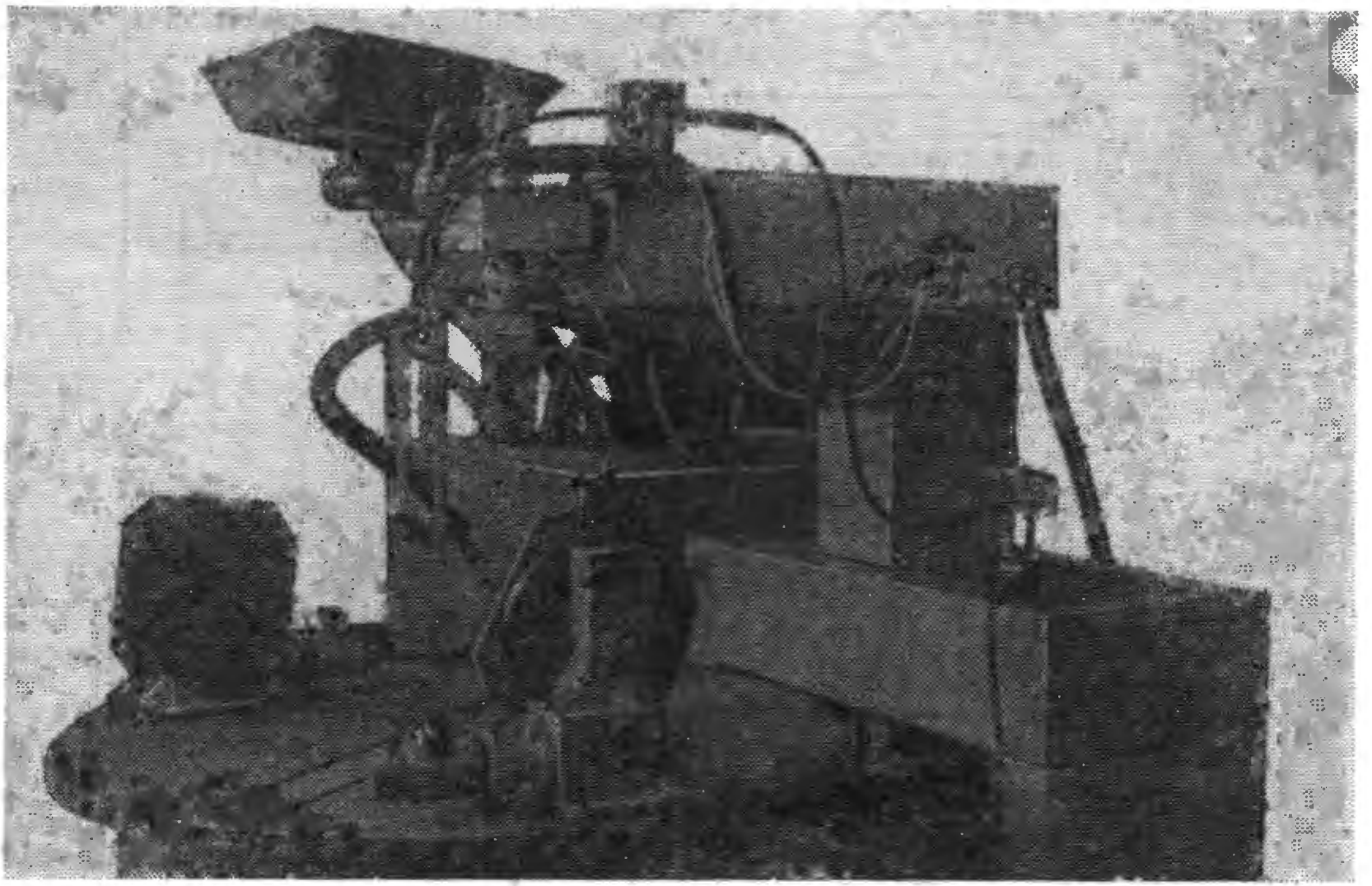


Рис. 2.9. Станок УД327 с ЧПУ для дуговой сварки швов сложной формы

**УУШП** — устройство управления шаговыми приводами, предназначенное для преобразования, формирования и усиления сигналов унитарного кода, поступающих из вычислителя, в сигналы управления токами фазовых обмоток шаговых двигателей типа ШД-5ДИМ-УЗ;

**БО** — блок оптронов является составной частью устройства и предназначен для гальванической развязки и согласования УЧПУ с силовыми цепями манипулятора. Информация поступает на все входы и выходы блока параллельно. В состав **БО** входят платы выходных оптронов, выходных усилителей, делителей, входных оптронов, связи с устройством связи с пультом (**УСП**), а также блок связи импульсного датчика:

**УСС** — устройство связи со станком (сварочной установкой), предназначенное для преобразования сигналов вычислителя в сигналы управления автоматикой и приводами.

Устройство УЧПУ Н55 выполнено по структуре специализированной ЭВМ с микропрограммным управлением. Микрокоманды хранятся в ПЗУ емкостью 2К 76-разрядных слов. УЧПУ Н55 обеспечивает: выход в исходную точку по всем координатам с помощью путевых датчиков грубого и точного останова; линейную интерполяцию по пяти координатам и круговую — по трем, а также разгон в начале движения и торможения при подходе к заданной точке по заданной программе.

Устройство УЧПУ Н55-1М было применено, например, для управления станком УД327 (рис. 2.9) для сварки корпусных конструкций небольших габаритных размеров. Манипулятор горелки имеет три переносных подвижности с величинами ходов ( $X = 500$  мм,  $Y = 400$  мм,  $Z = 320$  мм) и две ориентирующие подвижности, обеспечивающие вращение горелки вокруг вертикальной оси на угол  $380^\circ$  и наклон ее на угол  $0-90^\circ$  относительно вертикали. В комплект станка входят

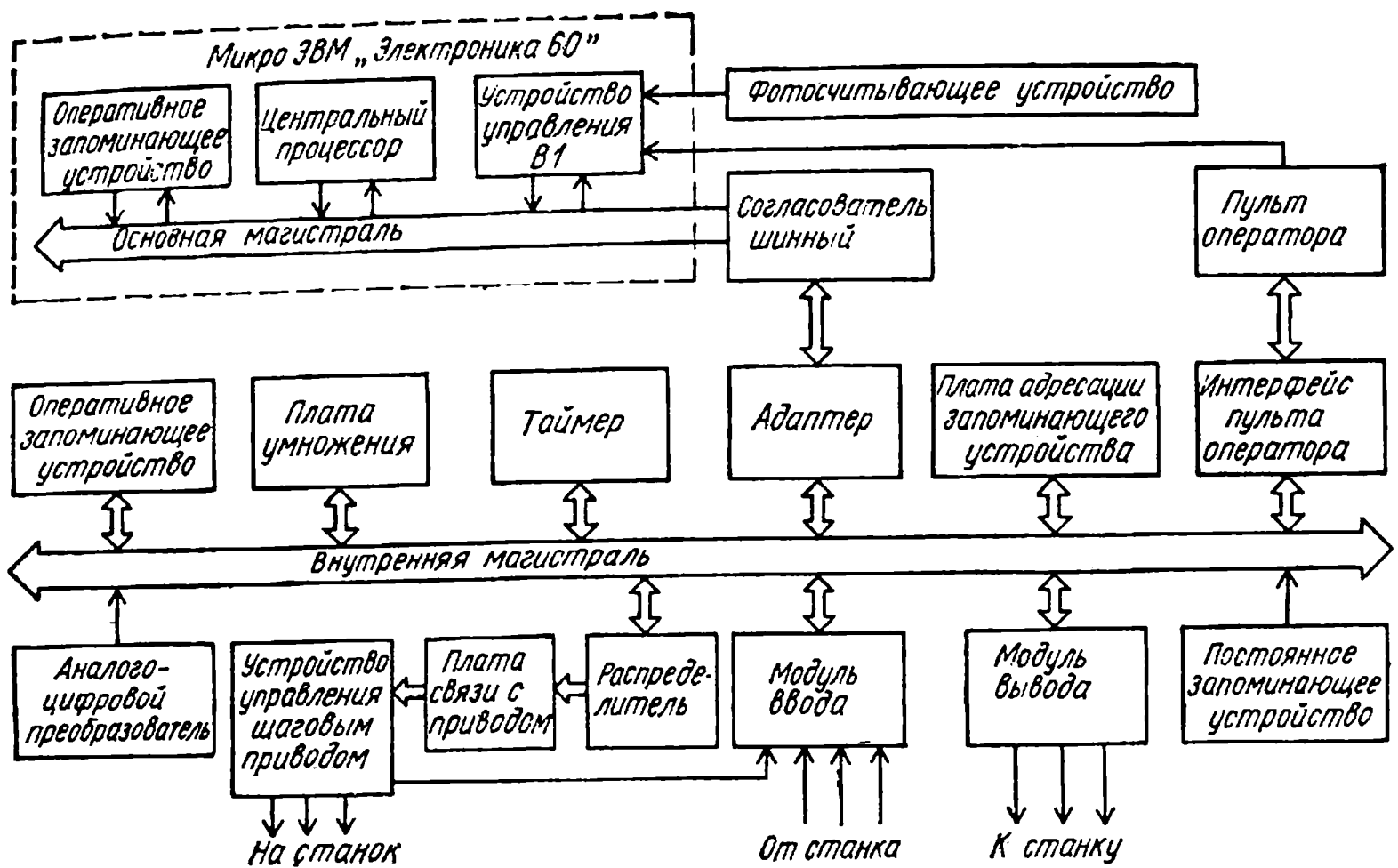


Рис. 2.10. Структурная схема устройства УЧПУ-2М-43

двухпозиционный поворотный стол и два модуля вращения изделия.

Для сварки угловых швов сложной формы, расположенных в плоскости или на поверхности цилиндра, удобны более простые УЧПУ НЗЗ, которые широко используются на отечественных заводах для управления металлорежущими станками. УЧПУ НЗЗ обеспечивает одновременное управление перемещениями по трем координатам при линейной интерполяции и по двум — при круговой. При управлении сварочным станком две координаты используют для обеспечения сварочного движения, а третью — для ориентации сварочной горелки под заданным углом к линии шва. УЧПУ НЗЗ выпускают в двух модификациях: НЗЗ-1М рассчитано на шаговый привод и НЗЗ-2М — на следящий привод.

В описанных выше устройствах ЧПУ программа задается на перфоленте в коде ISO. Перфолента перемещается в ходе отработки программы покадрово. После окончания цикла перфолента автоматически перематывается в исходное положение и цикл повторяется по команде оператора или по получении автоматически формируемой команды о готовности очередного изделия к сварке.

Современные устройства ЧПУ имеют память на всю программу. К этим устройствам относятся УЧПУ-2М-43, 2С85 и другие, построенные на базе микроЭВМ «Электроника 60». Структурная схема УЧПУ-2М-43 показана на рис. 2.10. Обмен информацией между центральным процессором (ЦП) и периферийными узлами устройства осуществляется по основной и внутренней магистралям.

Основная магистраль представляет собой канал микроЭВМ, выполненный по типу канала «Общая шина», к которой кроме АЦП непосредственно подключены динамическое ОЗУ и устройство управления В1, обеспечивающие связь основной магистрали с ФСУ, а также с ЭПМ «Консул 260» или пультом оператора. Остальные периферийные узлы устройства связываются с основной магистралью через

внутреннюю магистраль при помощи шинного согласователя и адаптера.

Внутренняя магистраль состоит из однонаправленных шин. Она обеспечивает связь ЦП с периферийными узлами устройства и связь устройства с внешними объектами.

Согласование микроЭВМ и интерфейсного блока осуществляется с помощью шинного согласователя, который расположен в каркасе с печатными платами микроЭВМ.

Адаптер обеспечивает связь ЦП с абонентами внутренней магистрали путем трансформации передаваемых сигналов. Кроме того, в адаптере формируются необходимые для обмена управляющие сигналы, а также осуществляется запоминание и дешифрация адреса абонента на время связи с ним ЦП.

Плата адресации запоминающего устройства (ЗУ) обеспечивает начальное обращение ЦП к массиву ЗУ, хранящему организующую программу.

Плата умножения предназначена для аппаратного умножения двух 16-разрядных двоичных чисел.

Таймер позволяет формировать запрограммированные выдержки времени, по которым организуются сигналы прерывания работы ЦП.

В оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) хранятся организующая программа, станочные константы и величины коррекций.

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) предназначено для хранения и считывания программного обеспечения УЧПУ-2М-43, причем хранение программного обеспечения осуществляется при включенных и отключенных источниках питания. ПЗУ работает в составе УЧПУ как асинхронное пассивное устройство, состоящее из 16 БИС памяти, логических схем адресации и управления.

Распределитель представляет собой линейный интерполятор, в котором формируются в унитарном коде импульсы, задающие дискретные координатные перемещения исполнительного органа станка (ИОС). Распределитель является типовым устройством и рассчитан на 8 координат.

Плата связи с приводом предназначена для согласования по длительности и уровням импульсов унитарного кода от распределителя с входами плат устройства управления шагового привода (УУШП) и гальванической развязки цепей интерфейсного блока и электрических цепей привода.

В интерфейсе пульта оператора происходит обмен информацией между пультом оператора и внутренней магистралью устройства.

Модуль ввода информации предназначен для гальванической развязки логических цепей интерфейсного блока от электрических цепей станка, УУШП или ЭВМ высшего уровня, а также согласования уровней сигналов, принимаемых по этим цепям. Модуль вывода информации предназначен для гальванической развязки логических цепей интерфейсного блока от электрических цепей внешних устройств, а также согласования уровней сигналов, передаваемых по этим цепям.

В центральном процессоре происходит обработка информации.

Устройство В1 обеспечивает управление электрифицированной пишущей машиной «Консул 260», фотоэлектрическим устройством ввода



с перфоленты «PS-1501», пультом оператора в составе ЭВМ типа «Электроника 60».

Пульт оператора предназначен для формирования позиционного кода места переключателей, установленных на блоке клавиатуры, а также световой и символьной индикации информации.

Ввод программы с перфоленты производится один раз — при запуске в обработку на данном станке партии изделий данного типоразмера. При отключении питания программа сохраняется в памяти УЧПУ в течение 72 часов. На пульте оператора обеспечивается алфавитно-цифровая индикация номера кадра, текущего положения рабочего органа относительно исходного положения, режима работы устройства. Предусмотрена коррекция скорости подачи в диапазоне 10—120 %, а также возможность двусторонней связи с ЭВМ верхнего уровня.

Станки и установки с программным управлением перемещениями широко применяются в сварочном производстве, особенно в связи с автоматизацией и роботизацией тяжелых и вредных для здоровья человека работ.

### **2.3. Системы программного управления сварочными циклами**

Наиболее простые программы управления сварочными циклами выполняются при механизированной дуговой сварке под флюсом и в защитных газах. Программа работы этих устройств заложена жестко уже на этапах разработки и изготовления оборудования и поэтому какие-либо изменения ее в процессе эксплуатации затруднены, поскольку это связано с перестройкой электрической и кинематической схем. Самый распространенный способ представления программы — *описание*. Описания разделяются по степени формализации. Наименее формализованным является содержательное описание на естественном языке, к которому для большей ясности и наглядности могут прилагаться таблицы, диаграммы и другой иллюстративный материал.

Широкое распространение для описания программы работы оборудования получили циклограммы. Циклограммы аналогичны временным диаграммам и отличаются от последних лишь тем, что их вычерчивают без соблюдения масштаба времени. Программу работы оборудования можно представить также в виде блок-схемы алгоритмов, графа функционирования [57] и другими способами. Ниже рассматриваются системы программного управления сварочными циклами дуговой сварки, для описания которых использованы наиболее распространенные на практике способы представления алгоритма функционирования.

Программное управление циклом механизированной сварки в среде защитных газов. На рис. 2.11 приведена циклограмма работы блока программного управления сварочным полуавтоматом, созданного совместно ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР и ВНИИЭСО и освоенного в серийном производстве. Блок позволяет осуществить управление процессами сварки длинных, коротких швов и сварки точками.

Сварка длинных швов начинается после однократного нажатия и отпускания командной кнопки «пуск», расположенной на рукоятке держателя горелки (рис. 2.11,а). При этом срабатывает клапан газо-



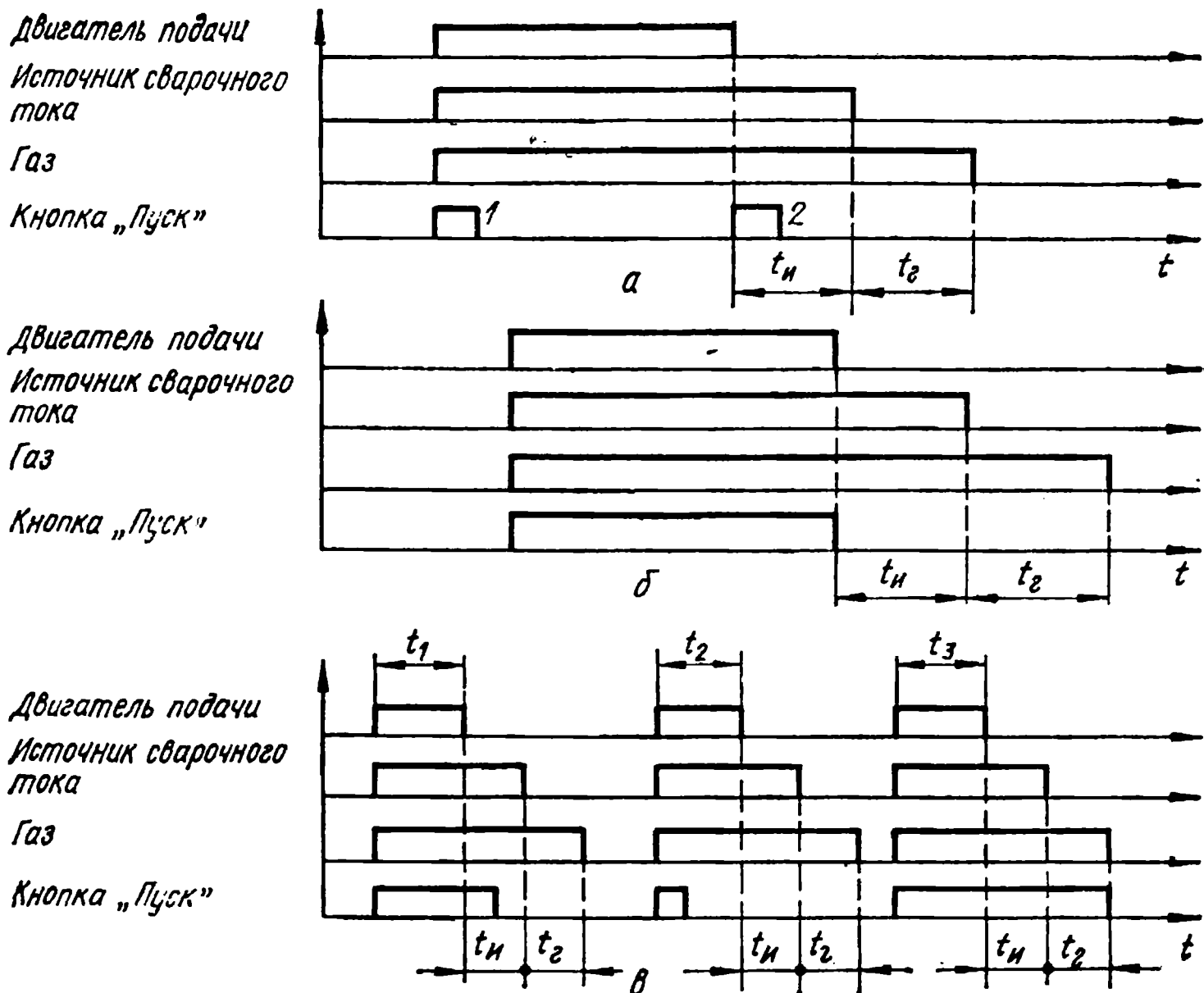


Рис. 2.11. Циклограмма работы блока программного управления сварочным полуавтоматом в режимах:

а) сварка длинных швов; б) сварка коротких швов; в) сварка точками

отсекателя и через нерегулируемое время, равное 0,5 с (на временной оси циклограммы эта выдержка времени не показана), включается двигатель подачи электродной проволоки и источник сварочного тока. При замыкании электрода на свариваемый металл возбуждается дуга и начинается сварка, которая продолжается до повторного нажатия кнопки на держателе горелки. После этого останавливается двигатель подачи электродной проволоки, происходит ее обгорание и дуга гаснет. С выдержкой времени  $t_n$  отключается источник сварочного тока, затем в течение времени  $t_r$  производится обдув кратера и разогретого металла шва защитным газом.

При сварке коротких (рис. 2.11,б) швов кнопка на держателе горелки остается нажатой и программа завершения процесса сварки начинается после ее отпускания.

В режиме сварки точками (рис. 2.11,в) двигатель подачи электродной проволоки включается на определенное время, заданное сварщиком с помощью переменного резистора, ось которого выведена на переднюю панель блока управления. Подача электродной проволоки производится в течение заданных интервалов времени  $t_1$ ;  $t_2$ ;  $t_3$ , которые не зависят от длительности нажатия кнопки, расположенной на держателе горелки. Программа завершения процесса сварки происходит автоматически после отключения двигателя.

Состав и работа блока управления, осуществляющего рассмотренные программы, приведены в прил. 3.

Программное управление циклом автоматической сварки плавящимся электродом. Устройство программного управления обеспечи-

вает цикл сварки в среде защитных газов или под флюсом в следующих режимах:

1. Автоматический режим — после нажатия кнопки «пуск» весь цикл сварки, начиная с определенной исходной позиции, осуществляется без непосредственного участия оператора;

2. Полуавтоматический режим, при котором сварку можно осуществлять, начиная с любой позиции по выбору оператора. При этом режим сварки на отдельных участках шва может быть изменен.

3. Наладочный режим, используемый для установочных движений сварочного инструмента, а также при наладочных и ремонтных работах. Источник сварочного тока в этом режиме отключен.

Упрощенный алгоритм функционирования при пуске автомата для сварки под флюсом приведен на рис. 2.12. Схема получает команду «пуск» (символ 1), после чего проверяются все блокировки (символ 2): наличие всех механизмов объекта управления в исходном положении, воды и системе охлаждения, флюса в бункере, изделия на сварочной позиции и т. д. Если хотя бы одна из блокировок сработала, то по единичному условию подается тревожный сигнал (символ 4). При нормальном состоянии блокировок осуществляется переход из символа условия 2 к символу 3. Если реле времени  $t_1$  не сработало, то включается источник сварочного тока — символ 5. Символ 6 определяет условие возбуждения дуги. Дуга может возбуждаться при неподвижном или перемещающемся с малой скоростью сварочном аппарате. Это условие задается переключателем, расположенным на пульте сварочного аппарата и имеющим положения «возбуждение на ходу», «возбуждение на месте».

При возбуждении дуги «На ходу» по нулевому условию символа 6 происходит переход к условному символу «Направление сварки» 34. На пульте сварочного аппарата обычно имеется переключатель направления сварки. По условиям символа 34 осуществляется переход на ветвь правого или левого движения. Если сварка ведется в левую сторону, то тогда через конечный выключатель 36 включается привод тележки 38 для перемещения ее влево. Символ 39 задает скорость этого перемещения, а также подает команду на включение флюсозатвора 7.

С помощью датчиков (например, реле) напряжения и тока дуги осуществляется возбуждение дуги. К началу выполнения программы источник сварочного тока включен, на промежутке электрод — изделие имеется напряжение, но ток отсутствует, так как электрод не касается изделия. По условию  $U_d \bar{I}_d$  (8, 10) включается привод подачи электродной проволоки (11—14) и при контакте ее торца с поверхностью изделия создаются условия для возбуждения дуги. При наличии на поверхности металла окалины, флюса, оксидных плен и других загрязнений надежному возбуждению дуги способствует перемещение торца проволоки по изделию при включенном приводе тележки. При коротком замыкании электрода на изделие начинает протекать ток  $I_d$  и напряжение источника уменьшается почти до нуля, т. е. формируется условие  $\bar{U}_d I_d$  (8, 9), направление подачи электрода реверсируется, электрод отрывается из изделия (13—16). В момент возбуждения дуги

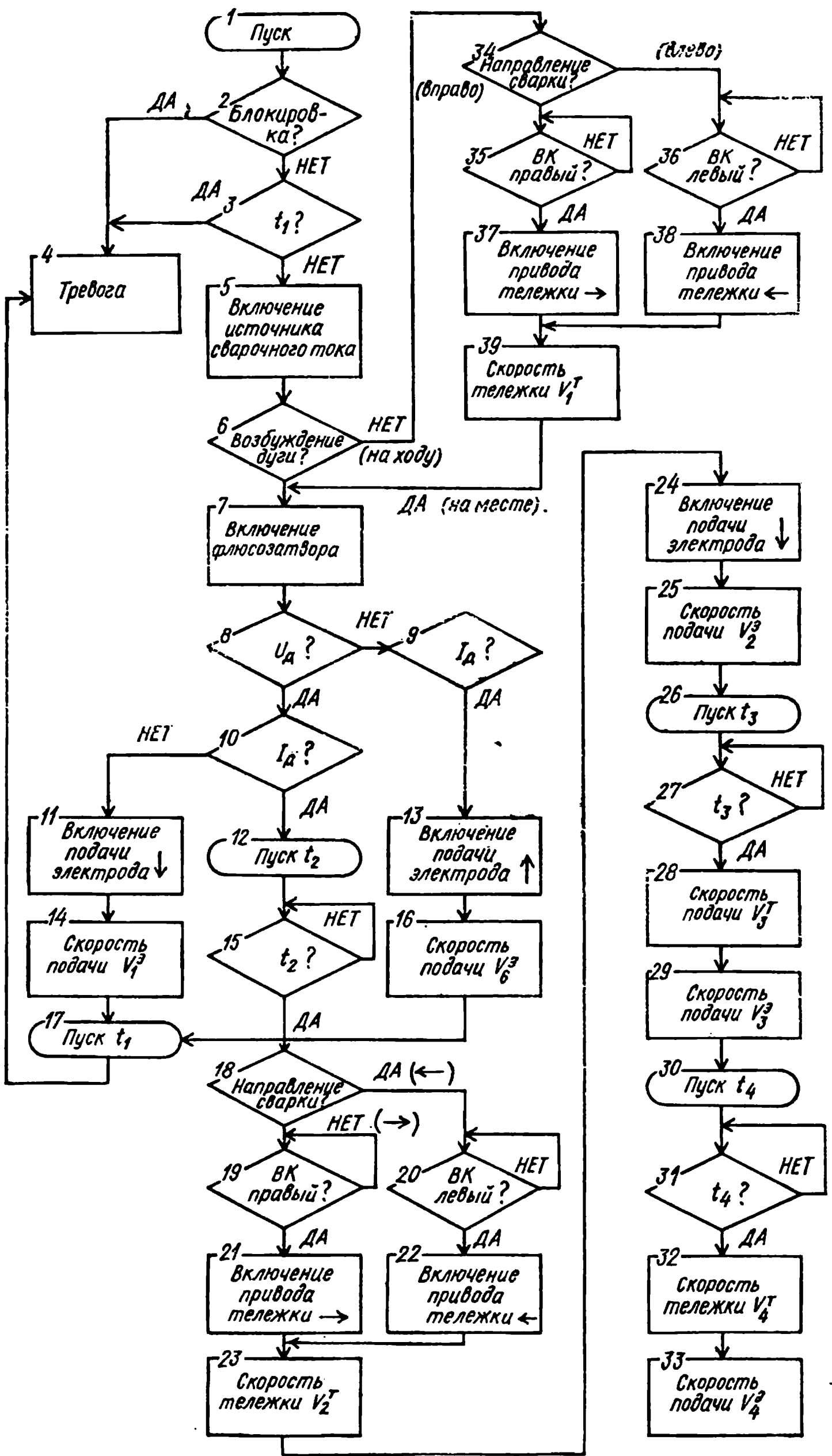


Рис. 2.12. Алгоритм функционирования автомата при пуске

формируется условие  $U_d I_d$  (8—10) и электрод начинает подаваться в зону сварки.

Возможен случай, когда при отрыве электрода дуга не возбуждается — тогда вновь возникнет условие  $U_d I_d$ , при котором электрод повторно подается к изделию. При отсутствии дуги цепи (11—14) и (13—16) обеспечивают возвратно-поступательное перемещение электрода к изделию до короткого замыкания. Эти же цепи запускают реле времени  $t_1$  (17), которое по истечении времени 3—5 с включает сигнал «Тревога» (4) и разрывает цепь отработки алгоритма «пуск сварки» (3). При нормальном возбуждении дуги формируется условие  $U_d I_d$ , по которому запускается реле времени  $t_2$  (12—15), выдающее через 0,5 с сигнал на отработку программы сварки начала шва (18, 20, 22). Скорости тележки и подачи электрода возрастают (23, 24, 25), после чего запускается реле времени  $t_3$  (26, 27) и т. д. Рассмотренный алгоритм возбуждения дуги и начала сварки применяется для электродов диаметром до 4 мм при наличии вводных технологических планок.

В тех случаях, когда возбуждение дуги осуществляют с помощью осцилляторов, после того, как произойдет пробой высоковольтным напряжением дугового промежутка и появится ток  $I_d$ , осциллятор отключают. Процесс сварки завершается по команде, поданной с пульта оператором-сварщиком или автоматически — от конечного выключателя. При этом выполняется программа заварки кратера: снижаются скорости сварки и подачи электрода. После остановки тележки прекращение подачи электродной проволоки происходит с выдержкой времени, вылет электрода оплавляется и дуга гаснет. Затем электрод на пониженной скорости отводится от изделия. На этом процесс сварки завершается, система возвращается в исходное состояние.

Рассмотренный алгоритм сравнительно простой и может быть использован при сварке труб большого диаметра, полотниц и многих других изделий. На практике часто встречаются случаи, когда сварочный процесс осуществляется по значительно более сложной программе, предусматривающей поперечное перемещение электрода (раскладку валиков), изменение тока, скорости сварки от прохода к проходу и т. д. Аппаратура управления должна содержать устройства, запоминающие выбранную программу и осуществляющие ее во время сварки. В простейших случаях требуемая программа устанавливается посредством устройства типа «конечный выключатель», срабатывающего по пути перемещения электрода относительно изделия. В более сложных случаях системы управления целесообразно строить на базе вычислительной техники. При этом система управления может выполнять контроль исправности технологического оборудования и документирование исполнения технологического процесса. Наиболее сложные циклы управления применяются при многопроходной сварке изделий большой толщины, например в атомном машиностроении. Сварка этих изделий продолжается непрерывно на протяжении нескольких часов или даже смен, причем одни параметры режима сварки должны изменяться по программе, а другие поддерживаться постоянными с высокой точностью.

Программное управление циклом сварки неплавящимся электродом (рис. 2.13). После нажатия на кнопку «Пуск» включается реле времени, задающее длительность предварительной продувки газа  $t_{п.г}$ , затем включается осциллятор и возбуждается дуга, после чего запускается реле времени:  $t_{р.н.д}$  — задержки включения регулятора напряжения дуги (РНД);  $t_{з.п.р}$  — задержки включения программы подачи присадочной проволоки;  $t_{з.к}$  — задержки включения привода каретки. После отработки временной задержки  $t_{р.н.д}$  включается РНД, который устанавливает требуемое напряжение на дуге либо периодически изменяет его (например, при импульсно-дуговой сварке — на рис. 2.13 не показано). Затем реле времени включает привод подачи присадочной проволоки и привод каретки. С момента  $t_{н.п}$  достижения установленного значения  $V_{пр}$  начинается выполнение рабочего этапа программы ( $t_{р.п}$ ), в течение которого параметры  $I_d$ ,  $U_d$ ,  $V_{пр}$ ,  $V_k$  и расход защитного газа в простейшем случае не изменяются.

Окончание цикла сварки  $t_c$  происходит по команде «Стоп сварка» с пульта или от конечного выключателя. С этого момента начинается выполнение конечного этапа программы  $t_{к.п}$ . При этом запускается первый программатор тока дуги и в течение времени  $t_{п.д}$  ток дуги снижается до значения  $I_{п.д}$ . После этого запускаются: второй программатор тока дуги и программатор снижения скорости подачи присадочной проволоки. Программатор тока дуги воздействует на РНД, который растягивает дугу до естественного обрыва, а программатор привода подачи сначала снижает скорость подачи до нуля, запирает РНД, после чего привод подачи на время  $t_p$  реверсируется и проволока отводится из изделия. После остановки каретки защитный газ в течение

времени  $t_{з.о}$  обдувает сварной шов и сварочный цикл заканчивается.

Для многих установок при сварке плавящимся и неплавящимся электродами цикл сварки оказывается значительно сложнее. При этом целесообразно использовать универсальные свободно програм-

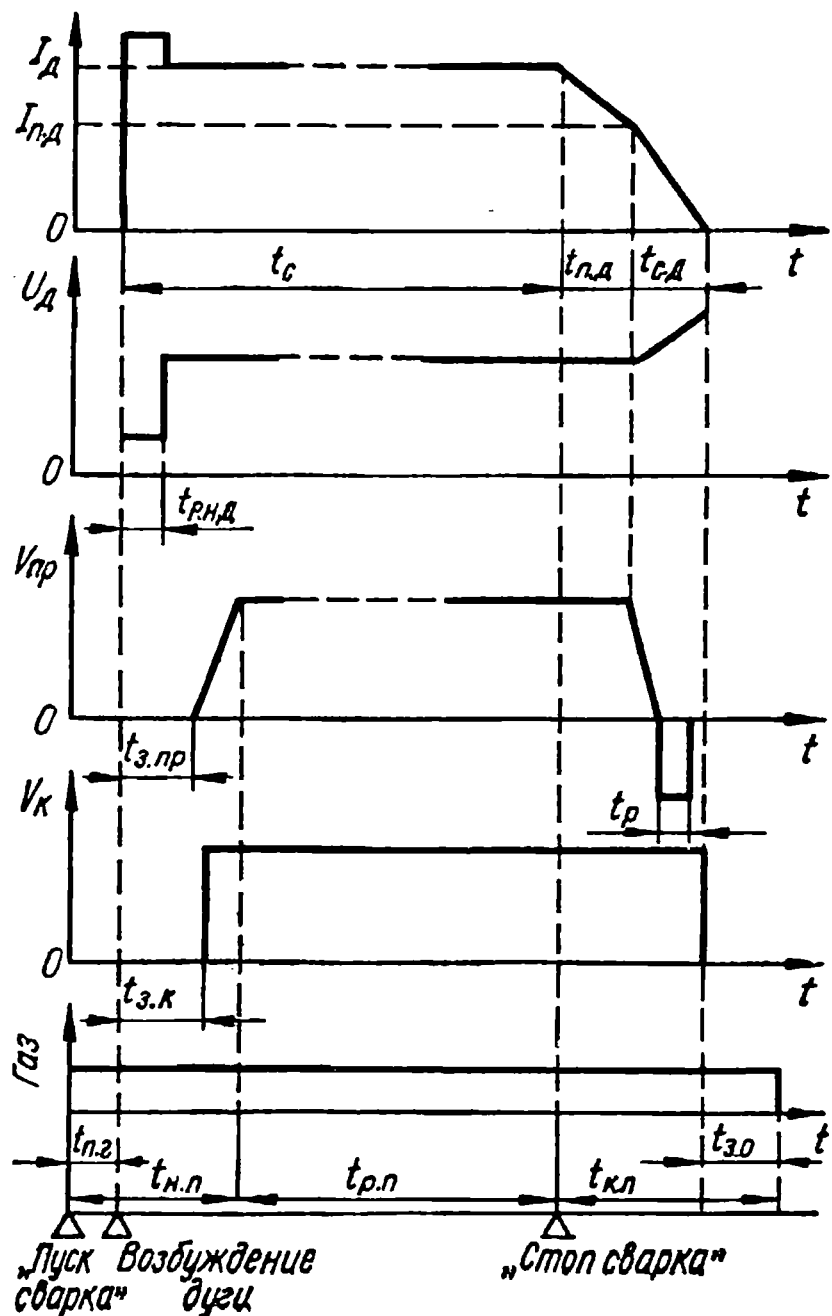
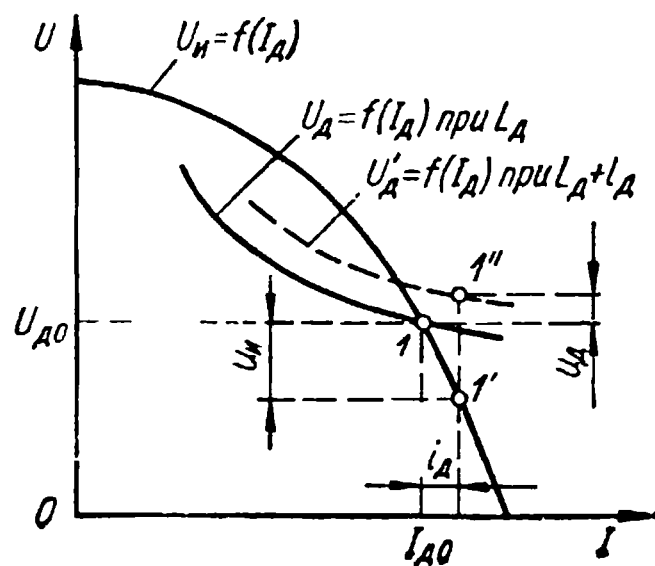


Рис. 2.13. Циклограмма работы устройства управления оборудованием для сварки неплавящимся электродом

Рис. 2.14. Внешняя характеристика источника питания ( $U_H$ ) и вольт-амперная характеристика дуги ( $U_d$ )





мируемые устройства управления. Применение таких устройств оправдано в установках для сварки неповоротных стыков толстостенных труб, когда в зависимости от положения в пространстве сварочной головки и номера прохода нужно изменить режим сварки, чтобы обеспечить требуемое формирование шва. Функциональная схема универсальной системы управления рассмотрена в прил. 4.

## 2.4. Саморегулирование дуги с плавящимся электродом

Особенностью электрических дуг при сварке плавящимся электродом является присущее им свойство самовыравнивания энергетического состояния в условиях возмущающих воздействий. Это явление называется саморегулированием дуги; его использование позволило создать автоматы для дуговой сварки с постоянной скоростью подачи электродной проволоки без применения дополнительных регуляторов. Условие устойчивости саморегулирования дуги при сварке плавящимся электродом может быть найдено с использованием статических вольт-амперных характеристик источника питания и дуги (рис. 2.14).

Увеличение длины дуги  $L_d$  на малую величину  $l_d$  сопровождается нарушением устойчивости режима сварки в точке  $I$  (рис. 2.14) и появлением отклонений сварочного тока  $i_d$  и напряжений источника питания в точке  $I'$ :

$$u_n \approx \left( \frac{\partial U_n}{\partial I_d} \right)_{I_{d0}} i_d \quad (2.1)$$

и дуги в точке  $I''$

$$u_d \approx \left( \frac{\partial U_d}{\partial I_d} \right)_{I_{d0}} i_d + \left( \frac{\partial U_d}{\partial L_d} \right) l_d. \quad (2.2)$$

В переходном процессе разность напряжений  $U_n - U_d$  равна падению напряжения на индуктивности  $L$  источника питания и сварочной цепи, т. е.

$$\left[ \left( \frac{\partial U_n}{\partial I_d} \right)_{I_{d0}} - \left( \frac{\partial U_d}{\partial I_d} \right)_{I_{d0}} \right] i_d - \frac{\partial U_d}{\partial L_d} l_d = L \frac{\partial i_d}{\partial t}$$

или

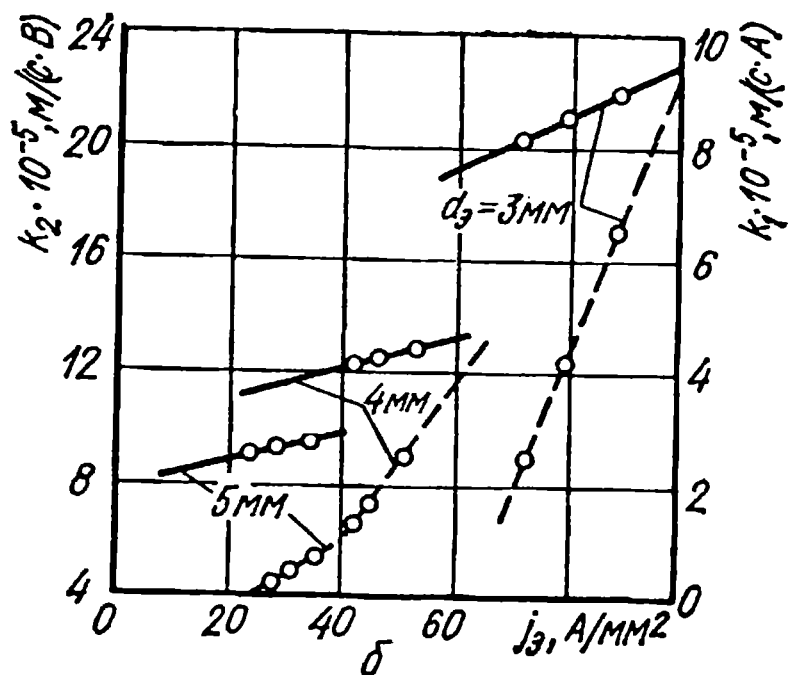
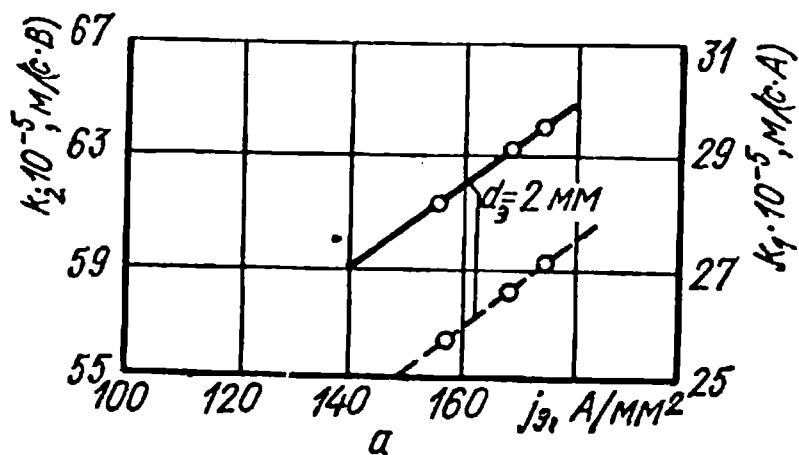
$$-k i_d - E l_d = L \frac{\partial i_d}{\partial t}, \quad (2.3)$$

где  $k = R_d - R_n$  с учетом того, что  $R_d = \left( \frac{\partial U_d}{\partial I_d} \right)_{I_{d0}}$  и  $R_n = \left( \frac{\partial U_n}{\partial I_d} \right)_{I_{d0}}$ ;  
 $\frac{\partial U_d}{\partial L_d} = E$  — градиент напряженности электрического поля в столбе дуги.

При сварке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки ( $V_n = \text{const}$ ) отклонение скорости  $v_z$  плавления электрода от установившегося значения определяет скорость изменения длины дугового промежутка:

$$\frac{dl_d}{dt} = v_z, \quad (2.4)$$

Рис. 2.15. Зависимость коэффициентов саморегулирования  $k_1$  (сплошная толстая основная линия) и  $k_2$  (штриховая линия) от плотности тока  $j_3$  в электроде



причем величина  $v_3$  зависит от отклонений тока и напряжения дуги

$$v_3 = k_1 i_d - k_2 u_d$$

или, с учетом принятых обозначений,

$$v_3 = k_1 i_d - k_2 (R_d i_d + E l_d), \quad (2.5)$$

где  $k_1, k_2$  — коэффициенты саморегулирования по току и напряжению дуги, взятые со своими знаками, т. е.  $(+k_1)$  и  $(-k_2)$  соответственно.

Абсолютные значения коэффициентов  $k_1, k_2$ , рассчитанные на основании экспериментальных данных, которые получены при сварке на переменном токе проволокой Св-08 под флюсом АН-348 [17], приведены на рис. 2.15, а, б. Совместное решение уравнений (2.3) — (2.5) дает следующую зависимость для изменения сварочного тока в переходном процессе при саморегулировании:

$$\frac{d^2 i_d}{dt^2} + \left( \frac{k}{L} + k_2 E \right) \frac{d i_d}{dt} + \frac{E}{L} (k_1 - k_2 R_n) i_d = 0. \quad (2.6)$$

При выводе уравнения (2.6) не учтено влияние вылета электрода на переходные процессы, предполагалось также, что перенос расплавленного металла с электрода в сварочную ванну не отражается на токе и напряжении дуги. Такие допущения, хотя и снижают точность определения величины  $i_d$ , однако позволяют выявить влияние главных факторов, определяющих устойчивость и характер переходных процессов при саморегулировании дуги с плавящимся электродом. Устойчивость системы, описываемой уравнением (2.6), согласно критерию А. Гурвица определится условиями:

$$\frac{k}{L} + k_2 E > 0; \quad \frac{E}{L} (k_1 - k_2 R_n) > 0. \quad (2.7)$$

Коэффициенты  $k_1 > 0$  и  $k_2 > 0$ , напряженность поля в столбе дуги  $E$  и индуктивность  $L$  — величины положительные, а  $k_2 R_n \ll k_1$ . Поэтому второе из условий (2.7) всегда выполняется.

Первое из условий (2.7) в случае неплавящегося электрода ( $k_2 = 0$ ) выполняется при  $k > 0$ , т. е. при

$$\left( \frac{\partial U_d}{\partial I_d} - \frac{\partial U_n}{\partial I_d} \right)_{I_{d0}} > 0. \quad (2.8)$$

Для плавящегося электрода ( $k_2 > 0$ ) условие устойчивости определяется неравенством

$$k > -k_2EL. \quad (2.9)$$

Поскольку всегда произведение  $k_2EL > 0$ , в случае сварки плавящимся электродом устойчивость возможна при отрицательных значениях  $k$  в пределах, определяемых условием (2.9). Однако произведение  $k_2EL$  мало отличается от нуля и поэтому условие устойчивости процесса сварки плавящимся электродом практически совпадает с условием (2.8) устойчивости горения дуги при сварке неплавящимся электродом.

Решение уравнения (2.6) зависит от корней  $p_1, p_2$  соответствующего характеристического уравнения, определяемых по формуле

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{k}{L} + k_2E \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{k}{L} + k_2E \right)^2 - (k_1 - k_2R_H) \frac{E}{L}}, \quad (2.10)$$

анализ которой указывает на зависимость качества переходного процесса при саморегулировании от индуктивности  $L$ . Если корни  $p_{1,2}$  — комплексные, то переходный процесс будет колебательным, при котором осложняется возбуждение дуги с короткого замыкания электрода на изделие. Индуктивность задерживает спадание тока  $i_d$  после возбуждения дуги. При большом токе  $i_d$  электрод быстро оплавляется, дуга растягивается и может оборваться. Опасность обрыва дуги будет заведомо исключена, если обеспечить апериодический переходный процесс, т.е. выполнить условие

$$\frac{1}{4} \left( \frac{k}{L} + k_2E \right)^2 > (k_1 - k_2R_H) \frac{E}{L}, \quad (2.11)$$

которое используется для определения максимально допустимого значения индуктивности.

Так, при сварке под флюсом электродной проволокой диаметром 2 и 5 мм при  $R_d \approx 0$ ,  $R_H \approx 0,04$  Ом и  $E = 3000$  В/м могут быть рекомендованы значения индуктивности  $L_2 \leq 0,45$  мГ и  $L_5 \leq 4,3$  мГ соответственно.

Индуктивность  $L$ , замедляя изменения тока в сварочной цепи, ослабляет саморегулирование. Постоянные времени процесса саморегулирования, равные  $1/p_1$  и  $1/p_2$ , согласно (2.10) тем меньше, чем меньше  $L$ . Поэтому, если перенос расплавленного металла происходит без коротких замыканий дугового промежутка, для сокращения времени переходных процессов при саморегулировании индуктивность  $L$  сварочной цепи необходимо ограничивать.

Для оценки путей повышения скорости саморегулирования целесообразно решить уравнение (2.3)—(2.5) при  $L \approx 0$ . В результате получим

$$\frac{di_d}{dt} + \frac{(k_1 + k_2R_H) E}{k} i_d = 0,$$

откуда

$$i_d = (i_{d_0} - I_d) e^{-t/\tau},$$

где  $i_{d_0}$  — отклонение тока дуги при  $t = 0$ ;  $I_d$  — установившееся значение тока;  $\tau$  — постоянная времени, определяемая зависимостью

$$\tau = \frac{k}{E(k_1 - k_2 R_n)}. \quad (2.12)$$

Поскольку  $k_2 R_n \ll k_1$  и  $k_1$  можно выразить по формуле

$$k_1 = \frac{a k_n}{\gamma d_3^2},$$

где  $a = 4/3,6\pi$  — коэффициент пропорциональности;  $k_n$  — коэффициент плавления, г/(А·ч);  $\gamma$  — плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $d_3$  — диаметр электрода, мм, зависимость (2.12) можно преобразовать к виду

$$\tau = \frac{k d_3^2 \gamma}{E a k_n}$$

или, если

$$k = R_d - R_n = \left( \frac{\partial U_d}{\partial I_d} - \frac{\partial U_n}{\partial I_d} \right)_{I_{d_0}},$$
$$\text{то } \tau = \frac{(R_d - R_n) d_3^2 \gamma}{E a k_n} = \frac{\left( \frac{\partial U_d}{\partial I_d} - \frac{\partial U_n}{\partial I_d} \right)_{I_{d_0}} d_3^2 \gamma}{E a k_n}. \quad (2.13)$$

Из выражения (2.13) следует, что для сокращения времени переходных процессов  $t_p \approx 3\tau$  при саморегулировании дуги необходимо стремиться к применению электродных проволок малого диаметра и уменьшению разницы динамических сопротивлений дуги  $\left( \frac{\partial U_d}{\partial I_d} \right)_{I_{d_0}}$  и источника питания  $\left( \frac{\partial U_n}{\partial I_d} \right)_{I_{d_0}}$ . Например, для повышения скорости отработки возмущений по длине дуги, возникающих вследствие произвольных колебаний руки сварщика, при механизированной сварке постоянным током используют наряду с электродной проволокой малого диаметра источники питания с малым сопротивлением (с жесткой внешней характеристикой).

При сварке на переменном токе такой способ интенсификации процесса саморегулирования не может быть использован в полной мере. Напряжение холостого хода сварочного трансформатора выбирается из условия надежного повторного возбуждения дуги и не может быть произвольно снижено. Поэтому постоянная времени  $\tau$ , пропорциональная в этом случае реактивному сопротивлению сварочной цепи, и, соответственно, длительность переходного процесса  $t_p$  зависят от режима сварки. Однако при всех условиях с уменьшением диаметра электрода интенсивность саморегулирования возрастает (рис. 2.16).

Допустимое время  $t_p$  определяют с учетом требований технологии сварки. При увеличении диаметра электродной проволоки и повыше-

нии токов дуги возрастает объем жидкого металла в сварочной ванне и значительно увеличивается инерционность протекания тепловых процессов. Поэтому, чем больше мощность дуги, тем более длительные отклонения режима сварки от заданного значения могут быть допущены.

Исследования сварки на переменном токе и длительный опыт эксплуатации сварочных аппаратов с постоянной скоростью подачи электрода позволили установить [24] значения тока дуги, ниже которых переходные процессы излишне затягиваются и устойчивость саморегулирования снижается (главным образом в связи с переходом к крупнокапельному переносу, сопровождающемуся резкими изменениями длины дуги):

$d_э, \text{ мм}$	2	3	4	5
$I_{д. \text{ min}}, \text{ А}$	250	350	450	650

Наиболее полное описание процесса саморегулирования можно получить, если отразить его структурной схемой, на которой отдельные элементы сварочного контура представляются совокупностью типовых динамических звеньев, а взаимодействие этих элементов — связями в виде стрелок (рис. 2.17).

Структурную схему начинают рассматривать с узла 0, т. е. с точки приложения задающей величины  $V_n$ , и затем перемещаются в направлении распространения сигнала.

К точке 0 приложены и возможные возмущения  $\tilde{v}_n$  и  $\tilde{v}_3$  (табл. 2.2), в результате воздействия которых происходит изменение длины дуги по формуле (2.3). Поэтому преобразование изменения скорости перемещения конца электрода в изменение длины дуги отображено в схеме интегрирующим звеном I. Всякое изменение длины дуги сопровождается соответствующим изменением ее напряжения. Для обычно при-

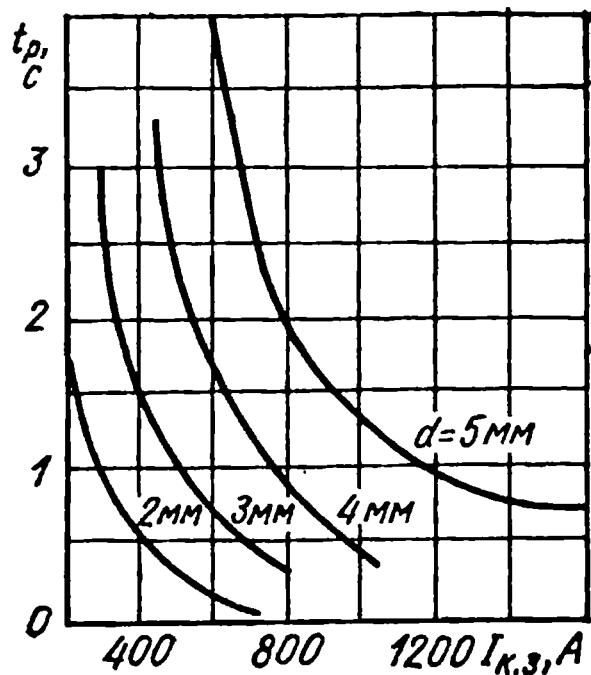


Рис. 2.16. Длительность переходных процессов  $t_p$  при сварке под флюсом электродной проволокой диаметром 2–5 мм

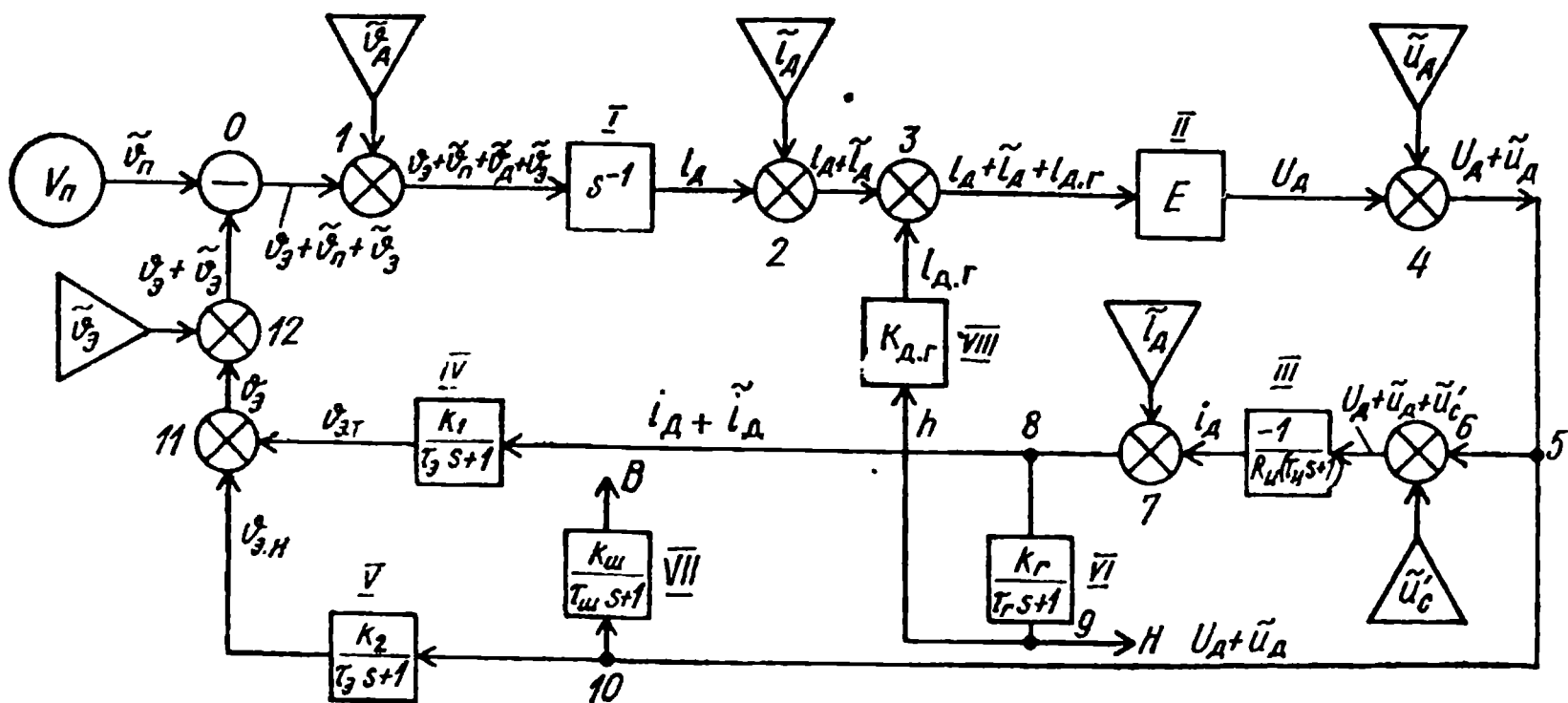


Рис. 2.17. Структурная схема процесса саморегулирования



Возмущение	Физический смысл
$\tilde{v}_п, \text{ м} \cdot \text{ с}^{-1}$	Колебания скорости подачи вследствие неустойчивой работы привода подачи электрода
$\tilde{v}_э, \text{ м} \cdot \text{ с}^{-1}$	Изменения скорости плавления электрода из-за изменений технологических условий
$\tilde{v}_д, \text{ м} \cdot \text{ с}^{-1}$	Относительная скорость конца электрода вследствие неровности свариваемой поверхности
$l_д, \text{ м}$	Изменения длины дуги, вызванные неровностью профиля изделия, капельным переносом металла электрода, флуктуациями дуги и т. д.
$u_д, \text{ В}$	Изменения напряжения дуги вследствие изменения ее физических параметров
$\tilde{i}_д, \text{ А}$	Изменения тока дуги вследствие изменения параметров источника питания, сварочного контура и т. д.

меняемых сварочных режимов связь между изменениями длины дуги и ее напряжением — пропорциональная, что отражено на схеме безынерционным звеном *II*. Изменение тока, следующее за изменением напряжения, зависит от сопротивления источника питания и будет происходить с запаздыванием, зависящим от постоянной времени источника  $\tau_n$ . Поэтому источник питания на схеме показан эквивалентным апериодическим звеном *III*.

Знак «—» означает, что при падающей внешней характеристике источника питания увеличению напряжения соответствует уменьшение тока и наоборот.

Отклонения тока и напряжения дуги сопровождаются соответствующими (см. формулу 2.5) изменениями скоростей плавления электрода  $v_{э.т}$  и  $v_{э.н}$ . Изменения этих скоростей плавления происходят инерционно в зависимости от постоянной времени  $\tau_э$  плавления электрода (см. звенья *IV*, *V*). Выходные сигналы контуров саморегулирования по току и напряжению, суммируясь в точке *II*, поступают на вход системы — узел *0*, в котором происходит сравнение скорости плавления электрода со скоростью его подачи.

Изменения тока сопровождаются изменением глубины проплавления, а изменения напряжения приводят к изменению ширины шва. Эти процессы отражены апериодическими звеньями *VI*, *VII*, передаточные функции которых содержат коэффициенты пропорциональности  $k_r = \Delta H / \Delta i_d$  и  $k_{ш} = \Delta B / \Delta U_d$  и постоянные времени плавления основного металла по глубине и ширине  $\tau_r$  и  $\tau_{ш}$ . Отклонение глубины провара приводит к изменению скрытой составляющей длины дуги  $l_{д.г}$ , что отражено в схеме безынерционным звеном *VIII*.

Таким образом, структурная схема описывает динамику саморегулирования, в процессе которого непрерывно сравнивается заданная скорость подачи электрода со скоростью его плавления, определяемой текущими значениями тока и напряжения дуги. Результат саморегулирования дуги — сохранение равенства  $V_э = V_п$  в условиях отклонений режима сварки под действием возмущений.

Структурная схема является основой для определения передаточных функций между изучаемой величиной и возмущением и последующего анализа динамики переходного процесса известными методами теории автоматического регулирования (см. прил. 5).

Установлено [24], что в большинстве случаев переходные процессы при саморегулировании протекают достаточно быстро и не отражаются на качестве сварных швов. Влияние возмущений на режим горения дуги в установившемся состоянии можно оценить, используя структурную схему. Наглядные результаты дает графический метод, основанный на использовании статической характеристики устойчивой работы [26].

В установившемся режиме абсолютные значения скоростей подачи и плавления

$$V_{\text{п}} = V_{\text{э}} = \text{const.} \quad (2.14)$$

С учетом (2.5) после совместного решения относительно тока получим

$$i_{\text{д}} = I_{\text{з}} + \frac{k_2}{k_1} U_{\text{д}}, \quad (2.15)$$

где

$$I_{\text{з}} = V_{\text{п}}/k_1.$$

Выражение (2.15) представляет собой уравнение статической характеристики устойчивой работы при заданной скорости подачи электрода. Каждому значению  $V_{\text{п}}$  соответствует вполне определенная характеристика устойчивой работы (рис. 2.18). Участок характеристики, выполненный штриховой линией, соответствует физически не реализуемым режимам горения дуги из-за низкого напряжения. Режим сварки определяется точкой  $A$  пересечения характеристик источника питания  $2$  и дуги  $1$ . Если по какой-либо причине дуга удлинилась, напряжение ее возрастает и режим дуги определится точкой  $B$ . Новое состояние является неустойчивым, так как ему в установившемся режиме должна соответствовать скорость плавления  $V_{\text{э}}^{\text{B}} < V_{\text{п}}$ , поскольку ток дуги уменьшился. Поэтому в соответствии с (2.4) произойдет уменьшение длины дуги, напряжение на ней будет падать до тех пор, пока не наступит равенство скоростей подачи и плавления, т. е. восстановится режим точки  $A$ .

При случайном укорочении дуги (точка  $B$ ) возрастание тока сопровождается увеличением скорости плавления, приводящим к восстановлению исходного режима.

Совместное рассмотрение статических характеристик дуги и источника питания позволяет сравнительно простым графоаналитическим методом определить установившиеся отклонения параметров режима дуги (статические ошибки) под влиянием различных возмущений. На рис. 2.19 изображены внешние характеристики источника питания

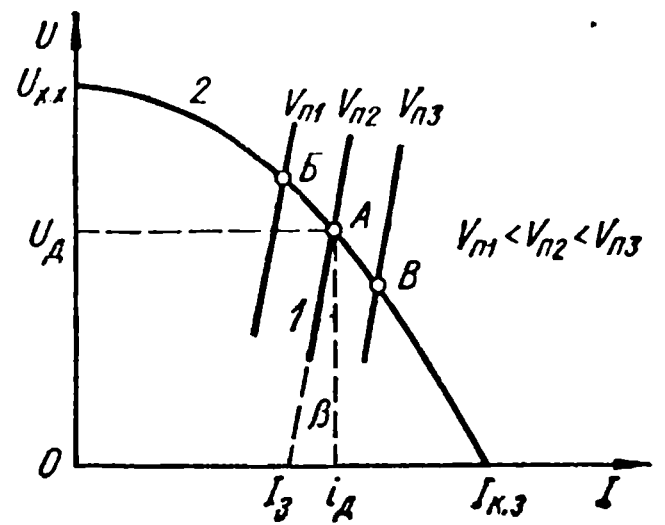


Рис. 2.18. Статические характеристики устойчивой работы (1) и внешняя характеристика источника питания (2)

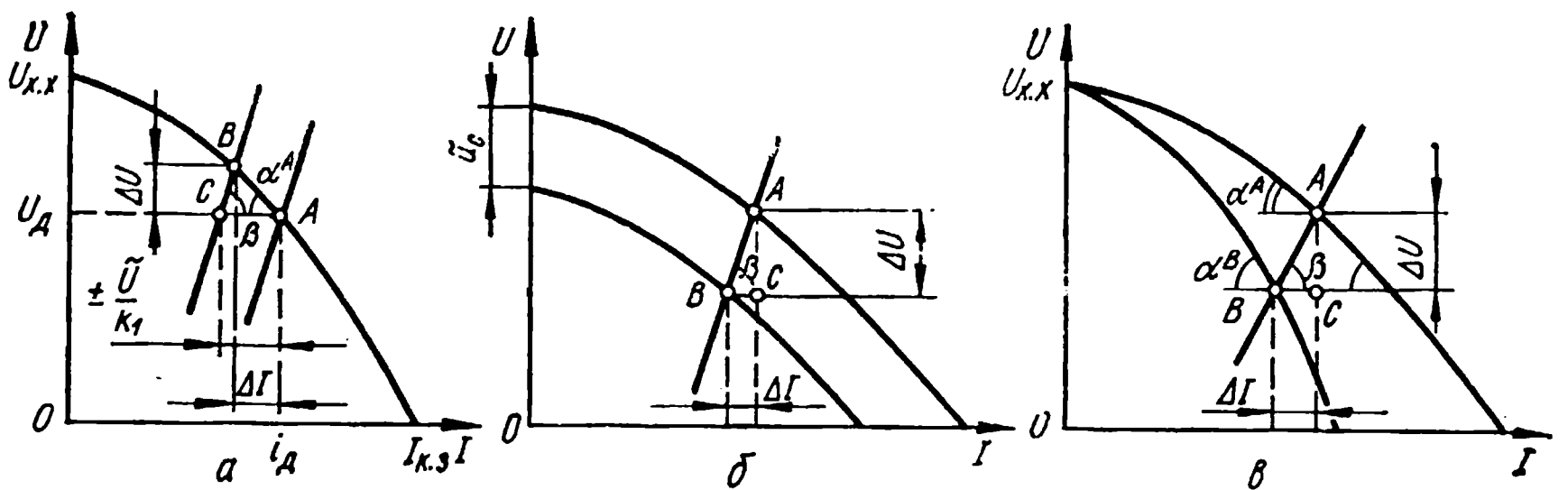


Рис. 2.19. К расчету статических ошибок

и характеристики устойчивой работы при действии на систему возмущения по скорости подачи (а), напряжению холостого хода источника (б), сопротивлению сварочной цепи (в). При возмущении по скорости подачи с учетом (2.15) новое уравнение статической характеристики устойчивой работы примет вид

$$i_d = I_3 \pm \frac{\tilde{v}_n}{k_1} + \frac{k_2}{k_1} U_d, \quad (2.16)$$

где  $\tilde{v}_n$  — отклонение скорости подачи от заданной.

Зависимость (2.16) отличается от (2.15) на постоянную величину ( $\pm \tilde{v}_n/k_1$ ) (рис. 2.19, а). Из треугольника ABC находим статические ошибки по току и напряжению (табл. 2.3). Там же приведены статические ошибки для случаев (б) и (в).

В тех случаях, когда характеристика устойчивой работы близка к вертикальной ( $k_2 \approx 0$ ), расчетные зависимости значительно упрощаются. При этом ошибки по току для возмущений по напряжению сети и сопротивлению сварочной цепи оказываются близкими к нулю. Это означает, что указанные возмущения не влияют на глубину проплавления. Ширина шва, наоборот, во всех случаях сварки под флюсом существенно зависит от рассмотренных выше возмущений.

Сварка плавящимся электродом в защитных газах отличается от сварки под флюсом. Во-первых, статические характеристики устойчивой работы при сварке в защитных газах могут иметь не только положительный, но и отрицательный наклон (при малых скоростях подачи электрода, когда процесс протекает с частыми короткими замыканиями дугового промежутка) [29]. Уравнение статической характеристики устойчивой работы для этого случая примет вид ( $k_2 > 0$ )

$$i_d = I_3 - \frac{k_2}{k_1} U_d. \quad (2.17)$$

Во-вторых, особенностью этого способа сварки является близкое к нулю внутреннее сопротивление используемых при этом источников питания с жесткими и пологопадающими внешними характеристиками.

Статические ошибки по току и напряжению для этого способа сварки можно рассчитать по формулам табл. 2.3 с заменой знака перед коэффициентом  $k_2$  на противоположный.

Поскольку для сварки плавящимся электродом в защитных газах применяют тонкую проволоку, возмущения по вылету электрода су-

Возмущение	Статическая ошибка	
	по току $\Delta I$	по напряжению $\Delta U$
По скорости подачи, $\tilde{v}$	$\frac{-\tilde{v}}{k_1 + k_2 R_H}$	$\frac{\tilde{v} R_H}{k_1 + k_2 R_H}$
По напряжению сети, $\tilde{u}'_c$	$\frac{\tilde{u}'_c k_2}{k_2 R_H + k_1}$	$\frac{\tilde{u}'_c k_1}{k_2 R_H + k_1}$
По сопротивлению сварочной цепи, $\tilde{r}_H$	$\frac{I_D^A (R_H^B - R_H^A) k_2}{k_1 + k_2 R_H^B}$	$\frac{I_D^A (R_H^B - R_H^A) k_1}{k_1 + k_2 R_H^B}$
	$\operatorname{tg} \alpha^B = R_H^B; \operatorname{tg} \alpha^A = R_H^A; \operatorname{tg} \beta = \frac{k_1}{k_2}$	

щественно влияют на сварочный ток и глубину проплавления. Это возмущение можно заменить эквивалентным возмущением по скорости подачи (рис. 2.19, а), в результате чего для статического расчета можно использовать рассмотренную ранее методику.

Динамика переходных процессов при сварке с короткими замыканиями зависит от соотношения длительности цикла капельного переноса и постоянной времени сварочной цепи и значительно отличается от динамических характеристик процесса без коротких замыканий.

Структурная схема процесса с короткими замыканиями является нелинейной, так как содержит релейные и импульсные элементы [13].

На принципе саморегулирования дуги построены распространенные аппараты для автоматической и механизированной сварки под флюсом и в защитных газах. Они просты и надежны, не требуют квалифицированного ухода. Однако в некоторых случаях возникающие под действием тех или иных возмущений отклонения размеров шва выходят за допустимые пределы. Для устранения этого недостатка применяют системы регулирования дуговой сварки с обратными связями.

## 2.5. Системы автоматического регулирования дуговой сварки

Системы автоматического регулирования (САР) энергетических параметров дуги. Уже в первых автоматах для дуговой сварки для стабилизации длины дуги была реализована система автоматического регулирования с обратной связью по напряжению дуги (АРНД). При сварке плавящимся электродом сигнал обратной связи используется для регулирования скорости подачи  $V_n$ .

Упрощенная структурная схема системы АРНД приведена на рис. 2.20. Собственно регулятор образован звеньями I—III, передаточные функции которых объяснены в табл. 2.4.

Контур саморегулирования, образованный звеньями IV—VIII, аналогичен рис. 2.17. Из схемы исключены звенья, отображающие





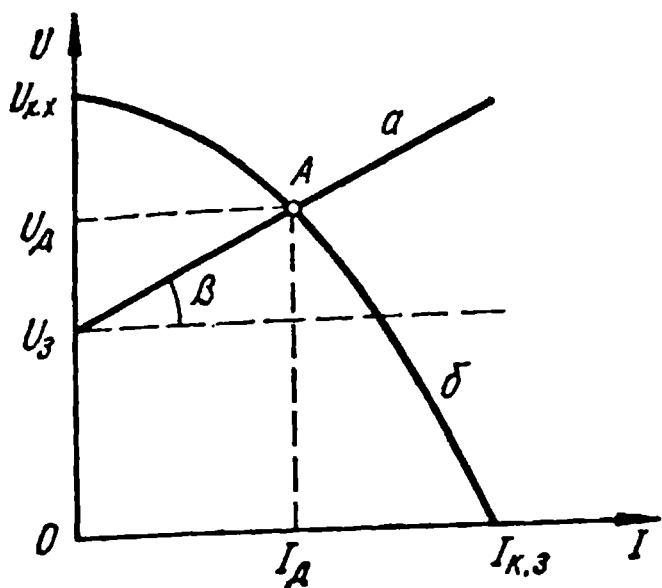


Рис. 2.21. Статическая характеристика системы АРНД (а) и внешняя характеристика источника питания (б)

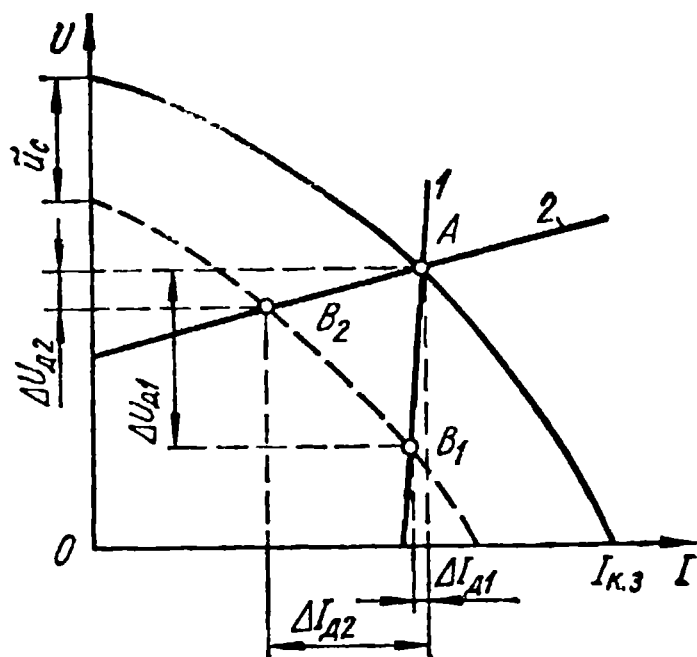


Рис. 2.22. Статические ошибки по току  $\Delta I_d$  и напряжению  $\Delta U_d$  дуги при использовании систем саморегулирования (1) и АРНД (2) в условиях колебания напряжения сети ( $\tilde{U}_c$ )

Для анализа статических ошибок по току и напряжению дуги под действием возмущений необходимо определить статическую характеристику регулятора.

Закон изменения скорости подачи

$$v_{\text{п}} = k_{\text{рег}} (U_d - U_0), \quad (2.20)$$

где  $U_0$  — заданное напряжение дуги.

Учитывая (2.4) для установившегося состояния ( $V_{\text{э}} = V_{\text{п}}$ ), имеем

$$U_d = U_3 + \frac{k_1}{k_{\text{рег}} + k_2} i_d, \quad (2.21)$$

где

$$U_3 = \frac{k_{\text{рег}}}{k_{\text{рег}} + k_2} U_0. \quad (2.22)$$

Из (2.21) следует, что статическая характеристика регулятора представляет собой прямую с углом наклона  $\beta = \text{arctg} \cdot \frac{k_1}{k_{\text{рег}} + k_2}$  (рис. 2.21).

Для того чтобы регулятор обеспечивал возможность настройки на режимы сварки в диапазоне от  $(I_d^{\text{max}}; U_d^{\text{max}})$  до  $(I_d^{\text{min}}; U_d^{\text{min}})$ , минимальный коэффициент передачи регулятора должен определяться из условия [15]:

$$\left. \begin{aligned} k_{\text{рег}}^{\text{min}} &= \frac{V_{\text{э}}^{\text{max}}}{U_d^{\text{min}} - U_3^{\text{min}}}; \\ U_3^{\text{min}} &\geq U_d^{\text{к.з}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

где  $V_{\text{э}}^{\text{max}}$  — максимальная скорость плавления электрода при заданных режимах сварки и диаметрах электрода;  $U_d^{\text{к.з}}$  — напряжение короткого замыкания электрода на деталь (при сварке под флюсом  $U_d^{\text{к.з}} = 5 \div 7$  В).

Статические ошибки  $\Delta I$  и  $\Delta U$  при действии на систему возмущений ( $\tilde{v}$ ,  $\tilde{U}_c$ ,  $\tilde{r}_n$ ) приведены в табл. 2.5.

Возмущение	Статическая ошибка	
	по току	по напряжению
По скорости подачи, $\tilde{v}$	$\frac{-\tilde{v}}{k_{\text{рег}}R_{\text{н}} + k_2R_{\text{н}} + k_1}$	$\frac{\tilde{v}R_{\text{н}}}{k_{\text{рег}}R_{\text{н}} + k_2R_{\text{н}} + k_1}$
По напряжению сети, $\tilde{u}_c$	$\frac{\beta\tilde{u}_c(k_2 + k_{\text{рег}})}{k_{\text{рег}}R_{\text{н}} + k_2R_{\text{н}} + k_1}$	$\frac{\beta\tilde{u}_ck_1}{k_{\text{рег}}R_{\text{н}} + k_2R_{\text{н}} + k_1}$
По сопротивлению сварочной цепи*, $\tilde{r}_{\text{н}}$	$\frac{I_{\text{д}}^A (R_{\text{н}}^B - R_{\text{н}}^A) (k_{\text{рег}} + k_2)}{k_1 + k_{\text{рег}}R_{\text{н}} + k_2R_{\text{н}}^B}$	$\frac{I_{\text{д}}^A (R_{\text{н}}^B - R_{\text{н}}^A) k_1}{k_{\text{рег}}R_{\text{н}}^B + k_2R_{\text{н}}^B + k_1}$

\*  $A$  и  $B$  — заданное и новое, при наличии возмущения, положения точки энергетического равновесия (см. рис. 2.19).

Из сравнения углов наклона  $\beta$  статических характеристик устойчивой работы (см. рис. 2.18, табл. 2.3) и системы АРНД (рис. 2.21, табл. 2.5) следует, что в первом случае он больше, чем во втором (так как всегда  $k_1/k_2 > k_1/(k_2 + k_{\text{рег}})$ ). Поэтому колебания напряжения сети в случае постоянной скорости подачи отражаются в первую очередь на напряжении дуги, а при использовании системы АРНД — на токе дуги (рис. 2.22).

Систему АРНД с воздействием на скорость подачи целесообразно применять в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к точности стабилизации напряжения (сварка и наплавка под керамическими флюсами, прецизионная наплавка легированного слоя и т. д.). При выборе значения коэффициента усиления регулятора необходимо иметь в виду, что с увеличением  $k_{\text{рег}}$  уменьшается статическая ошибка по напряжению, но одновременно увеличивается ошибка по току.

Функциональная схема системы АРНД с тиристорным приводом приведена на рис. 2.23, а. На входе операционного усилителя  $DD1$  сравниваются фактическое  $u_{\text{д}}$  и заданное  $U_3$  напряжения дуги. Выходной сигнал  $DD1$  управляет тиристорным приводом ТП. Если выполняется условие  $R2 = R3 = R$ , управляющее напряжение

$$u_{\text{п}} = k_{\text{уп}}(u_{\text{д}} - U_3), \quad (2.24)$$

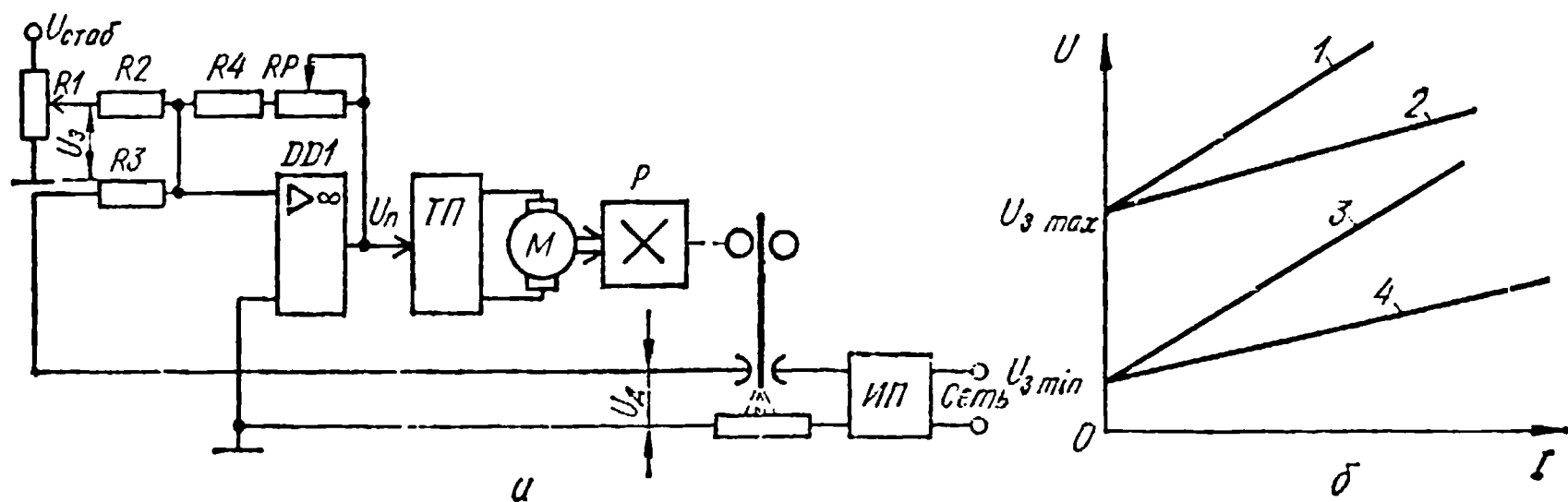


Рис. 2.23. Функциональная схема (а) и статические характеристики (б) системы АРНД с тиристорным приводом

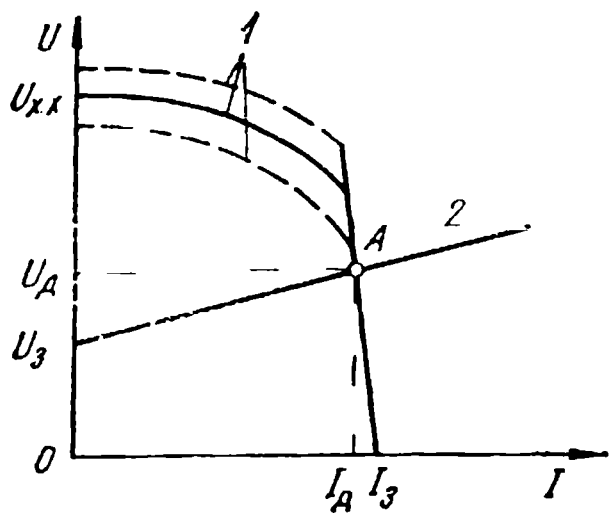


Рис. 2.24. Статические характеристики системы с двумя регуляторами:

1 — внешние характеристики источника питания при разных напряжениях холостого хода (вертикальный участок — статическая характеристика регулятора тока с воздействием на сопротивление источника питания); 2 — статическая характеристика АРНД

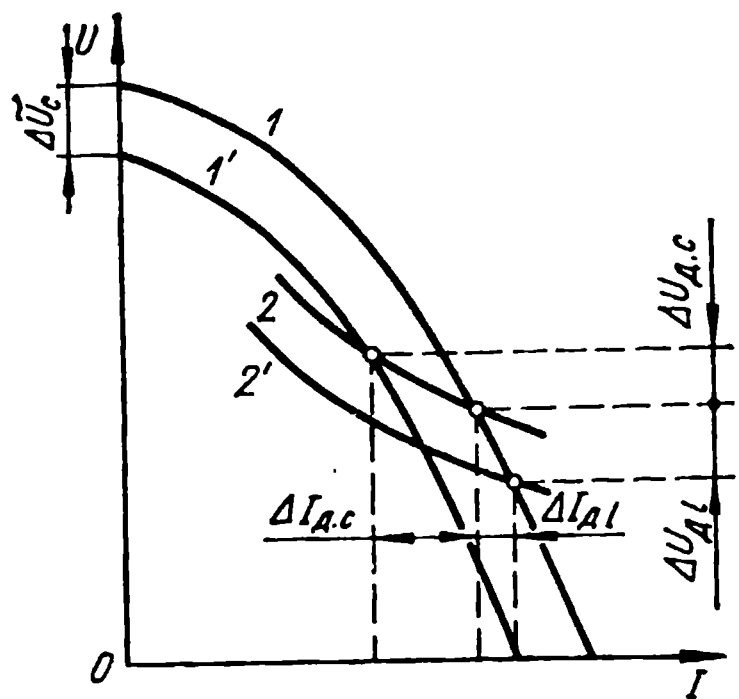


Рис. 2.25. Влияние возмущений по напряжению сети и длине дуги на статические ошибки по току и напряжению;

1—1' — внешние характеристики источника питания при колебаниях напряжения сети; 2—2' — статические вольт-амперные характеристики дуги при различных длинах дуг

где  $k_{yc} = -\frac{R4 + R5}{R}$  — коэффициент усиления операционного усилителя.

Изменением  $RP$  осуществляется настройка необходимого значения  $k_{yc}$ , а следовательно, коэффициента усиления регулятора.

Таким образом, каждому из предельных значений  $U_{з\ max}$  и  $U_{з\ min}$ , устанавливаемых потенциометром  $R1$ , соответствуют статические характеристики регулятора (см. рис. 2.23, б) при  $k_{рег}^{max}$  (2 и 4) и  $k_{рег}^{min}$  (1 и 3).

Обратная связь по напряжению дуги может использоваться для воздействия не только на скорость подачи, но и на э. д. с. источника питания или сопротивления сварочной цепи. В системе с воздействием на э. д. с. сигнал рассогласования между заданным и фактическим напряжениями дуги после усиления и необходимых преобразований используется для стабилизации напряжения на дуге. Проще всего такая система регулирования реализуется с помощью источника постоянного тока с тиристорным выпрямителем. Такие источники питания получили широкое распространение.

Сварочная головка с постоянной скоростью подачи и выпрямитель, работающий в режиме регулятора напряжения, в отличие от рассмотренных ранее систем саморегулирования дуги и АРНД обеспечивают стабильность режима сварки по току и напряжению в условиях колебаний напряжения сети. Возмущения по скорости подачи проволоки, которые могут возникнуть из-за недостаточной жесткости привода, овальности проволоки и других причин, вызывают в рассматриваемой системе соответствующие изменения тока. На токе отражаются также изменения вылета электрода.

Статические и динамические свойства регуляторов энергетических параметров дуги можно улучшить, применив системы с двумя регуляторами: АРНД с воздействием на скорость подачи и регулятором тока, воздействующим на источник питания (рис. 2.24). При отсутствии возмущений по вылету электрода эта система по статическим

своим свойствам равноценна системе с постоянной скоростью подачи и источником питания — стабилизатором напряжения на дуге, однако динамические свойства в первом случае могут быть выше. Отрабатываются и возмущения по скорости подачи.

Регуляторы тока (или напряжения) с воздействием на источник питания в настоящее время реализуются в схемах универсальных сварочных выпрямителей с тиристорным управлением, например, в широко распространенном сварочном выпрямителе ВДУ-504 (см. прил. 6).

При механизированной сварке наибольшее влияние на параметры режима оказывают колебания сетевого напряжения и изменения вылета электрода вследствие произвольных колебаний руки сварщика. В этом случае целесообразно использовать системы с воздействием на скорость подачи, обеспечивающие оптимальное соотношение между током и напряжением [14]. Такой регулятор уменьшает статические ошибки, повышает устойчивость горения дуги на малых токах и снижает разбрызгивание электродного металла.

**Системы автоматического регулирования длины дуги.** Одна из отличительных особенностей способа сварки неплавящимся электродом — отсутствие самовыравнивания энергетического состояния дуги. Следствием этого является зависимость напряжения и тока дуги от ее длины. При удлинении дуги ее статическая вольт-амперная характеристика смещается вверх и вправо, а при укорочении — влево и вниз (рис. 2.25). Ошибки  $\Delta U_{д.с}$  и  $\Delta I_{д.с}$ , возникающие при изменении э. д. с. источника питания, могут быть сведены к нулю при использовании источников со стабилизированным напряжением. Пути построения таких источников рассмотрены выше.

Устранение ошибок  $\Delta U_{д}$  и  $\Delta I_{д}$  достигается с помощью САР длины дуги. Основным источником информации о длине дуги — ее напряжение. Это следует из (2.2), если принять  $i_{д} \approx 0$ , что справедливо для крутопадающих характеристик источников питания, используемых при сварке неплавящимся электродом. Использование обратной связи по напряжению дуги позволяет построить замкнутую САР, которую называют системой АРНД с неплавящимся электродом.

В современных системах АРНД широко применяют цифровое управление электроприводами на базе шаговых электродвигателей. При этом стабилизируется не только напряжение дуги, но и для обеспечения стационарности потока защитного газа (расстояние «сопло — металл») регулируются величина погружения электрода в ванну и другие технологические операции (см. прил. 7).

У маломощных дуг зависимость между длиной и напряжением является нелинейной, поэтому для стабилизации длины дуги необходимо применять измерительные преобразователи, непосредственно контролирующие расстояние между электродом и поверхностью сварочной ванны. Наиболее удобными для этой цели являются струйные пневматические или электропневматические датчики, устанавливаемые на сварочной горелке над поверхностью изделия. При изменении расстояния между свариваемой поверхностью и соплом датчика изменяется аэродинамическое сопротивление зазора между датчиком и изделием. Происходящее при этом изменение давления газа (аргона)

в камере датчика преобразуется в непрерывный или дискретный электрический сигнал. Для прецизионных измерений расстояния между сварочной горелкой и изделием с точностью порядка  $10^{-1}$  мм применяют фотометрические, оптические и другие преобразователи.

**Системы автоматического регулирования вылета (АРВ) электрода.** В случае плавящегося электрода системы с постоянной скоростью подачи так же, как и системы автоматического регулирования напряжения дуги и тока с воздействием на скорость подачи проволоки или источник питания, не отрабатывают возмущений по вылету электрода. В то же время при автоматической сварке на повышенных плотностях тока вылет электрода — один из важнейших параметров режима, поскольку от его величины зависят: энергетические характеристики, стабильность и характер переноса электродного металла. Чаще всего возмущения по вылету электрода являются причиной нарушения установленных параметров режима при непрерывной многопроходной сварке, сварке кольцевых швов, расположенных в вертикальной плоскости и имеющих радиальные биения вследствие неточности подготовки и сборки изделий.

Основное влияние вылета на энергетические характеристики сварочного контура состоит в том, что изменения вылета сопровождаются таким перераспределением мощностей между анодом (при сварке на обратной полярности) и вылетом, что сумма их остается примерно постоянной.

Мощность, необходимая для плавления электрода при постоянной скорости его подачи:

$$P_{\text{э}} = P_{\text{в}} + P_{\text{д}} = \text{const}; \quad (2.25)$$

$$P_{\text{в}} = I_{\text{д}}^2 R_{\text{в}}; \quad (2.26)$$

$$P_{\text{д}} = U_{\text{э}} I_{\text{д}}, \quad (2.27)$$

где  $R_{\text{в}}$  — сопротивление вылета;  $U_{\text{э}} = U_{\text{а}} + U_{\text{в}}$  — сумма анодного падения напряжения и работы выхода электрона.

После подстановки (2.26), (2.27) в (2.25) получим:

$$I_{\text{д}}^2 + \frac{U_{\text{э}}}{R_{\text{в}}} I_{\text{д}} - \frac{P_{\text{э}}}{R_{\text{в}}} = 0. \quad (2.28)$$

Решением (2.28) является:

$$I_{\text{д}} = -\frac{U_{\text{э}}}{2R_{\text{в}}} + \sqrt{\frac{U_{\text{э}}^2}{4R_{\text{в}}^2} + \frac{P_{\text{э}}}{R_{\text{в}}}}. \quad (2.29)$$

Из (2.25)—(2.27) следует, что при нулевом вылете ( $R_{\text{в}} = 0$ )

$$I_{\text{д}}^0 = P_{\text{э}}/U_{\text{э}}. \quad (2.30)$$

Из (2.29) следует, что с увеличением вылета ток уменьшается. Значит, возмущения по вылету будут сопровождаться отклонениями глубины провара и соотношения долей основного и электродного металла в сварном соединении. Представление о влиянии вылета электрода на режим сварки можно получить также из совместного рассмотрения внешних характеристик источника питания и кривых устойчивой работы при



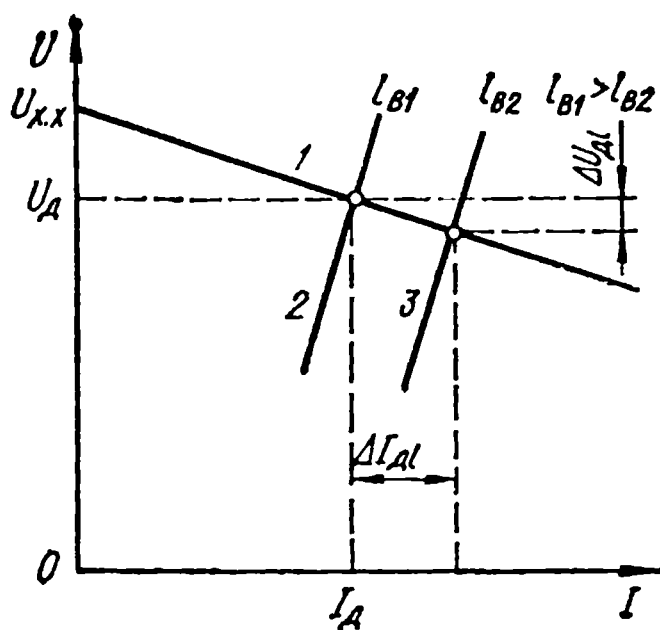


Рис. 2.26. Влияние вылета электрода на режим сварки:

1 — внешняя характеристика нестабилизированного источника питания; 2, 3 — кривые устойчивой работы при различных вылетах электрода

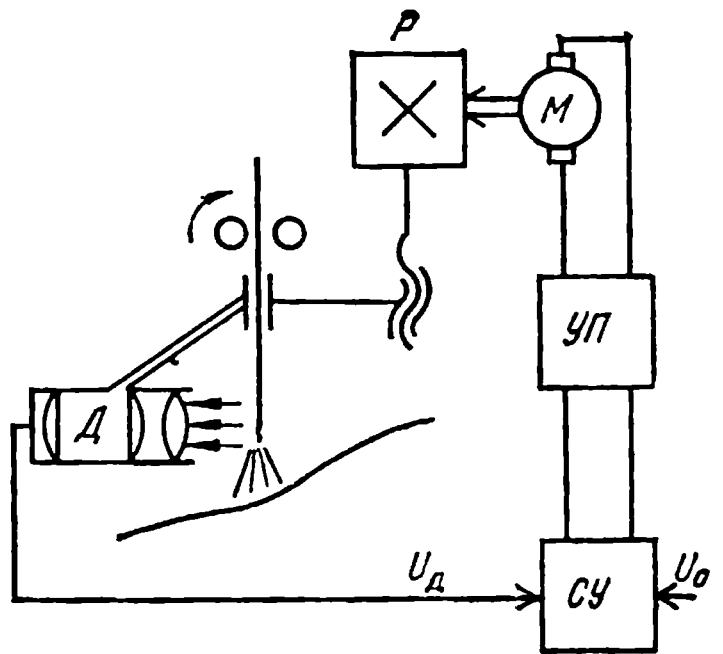


Рис. 2.27. Система АРВ электрода с фотоэлектрическим датчиком

различных значениях вылета (рис. 2.26). С уменьшением вылета (при постоянной скорости подачи электрода) кривая устойчивой работы смещается в сторону больших токов.

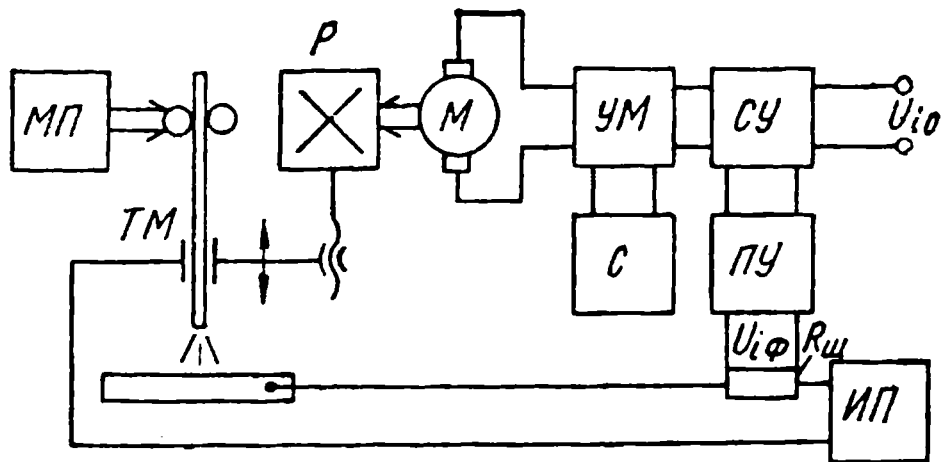
При сварке плавящимся электродом в среде защитных газов, когда применяются источники питания с внешними характеристиками, близкими к жестким, возмущения по вылету, в первую очередь, влияют на ток дуги (статическая ошибка  $\Delta I_{dl}$ ). Так, в случае жесткой внешней характеристики источника питания статическая ошибка по напряжению  $\Delta U_{dl}$  оказывается равной нулю. Поэтому при разработке систем автоматического регулирования вылета электрода целесообразно ввести в регулятор сигнал обратной связи по току дуги.

Простейшим решением по стабилизации вылета (расстояния между токоподводом и свариваемой поверхностью) является механическая система с «плавающей» сварочной головкой, опирающейся посредством копирных роликов или щупа непосредственно на свариваемое изделие вблизи зоны сварки [40]. В процессе движения сварочного аппарата «плавающая» головка или «плавающий» мундштук копируют вертикальные неровности вблизи зоны сварки, обеспечивая тем самым постоянство вылета. Иногда, чтобы повысить чувствительность копирующих устройств, их снабжают измерительными преобразователями (например, потенциометрическими), преобразующими перемещение копирующего элемента в электрический сигнал.

Основной недостаток систем копирования — невозможность совмещения зоны копирования и зоны сварки, вследствие чего изменения вылета в зоне сварки и перемещения «плавающей» головки оказываются неадекватными. Компенсация транспортного запаздывания при введении запоминающих устройств значительно усложняет систему и снижает надежность ее работы [40]. Кроме того, применение копирующих устройств возможно для ограниченного числа типов изделий и видов сварных швов.

При многопроходной сварке в случаях, когда высоту каждого укладываемого в разделку валика можно с определенной точностью установить заранее, применяют систему программного регулирования вылета. Она содержит электромеханическое программное устройство,

рис. 2.28. Функциональная схема системы АРВ с обратной связью по току:  
 МП — механизм подачи; Р — редуктор;  
 М — исполнительный двигатель; ТМ — мундштук;  
 УМ — усилитель мощности; С — сигнализатор;  
 СУ — сравнивающее устройство; ПУ — предварительный усилитель сигнала обратной связи; ИП — источник питания



обеспечивающее подъем сварочной головки на заранее установленную величину по мере заполнения разделки.

Общая особенность рассмотренных систем — отсутствие обратных связей по фактическому значению вылета электрода и электрическим параметрам дуги. Поэтому эти системы нечувствительны к изменениям вылета вследствие колебаний напряжения дуги, скорости плавления электрода и т. д.

Основная трудность при разработке замкнутых систем автоматического регулирования вылета электрода — получение информации о величине вылета. Для этой цели удобно применять фотоэлектрический датчик, в поле зрения которого располагается переходная область между концом плавящегося электрода и столбом дуги (рис. 2.27). Световой поток от этой области преобразуется датчиком  $D$  в электрический сигнал  $u_d$ , который сравнивается в СУ с эталонным сигналом  $U_0$ . При изменении расстояния между токоподводом и свариваемой поверхностью будет изменяться (вследствие саморегулирования длины дуги) длина нерасплавившейся части электрода, а световой поток будет уменьшаться (при увеличении вылета) либо возрастать (при уменьшении вылета) по сравнению с его номинальным значением.

Сигнал рассогласования, выделенный в СУ, после усилителя-преобразователя УП используется для управления двигателем М. Последний посредством редуктора Р осуществляет подъем или опускание токоподводящего мундштука вместе с закрепленным на нем датчиком до тех пор, пока в поле зрения датчика вновь не окажется переходная зона «электрод—дуга». При этом сигнал датчика по величине сравнивается с эталонным сигналом и система приходит в состояние равновесия. Таким образом, перемещения мундштука в вертикальной плоскости, копируя неровности свариваемой поверхности, обеспечивают сохранение постоянства величины вылета электрода. При сварке алюминия плавящимся электродом в среде аргона точность стабилизации вылета составляет  $\pm 0,25$  мм.

Существенный недостаток рассмотренной системы АРВ — конструктивная сложность и невозможность использования ее в тех случаях, когда измерение светового потока от торца электрода затруднено конструктивными элементами, при сварке в узкую разделку и т. п.

При сварке в защитных газах электродами малого диаметра вылет электрода существенно влияет на сварочный ток. Эта зависимость использована для построения системы АРВ с обратной связью по току (рис. 2.28) [42]. Падение напряжения на шунте  $R_{ш}$ , пропорциональное фактическому значению тока, после предварительного усиления сравнивается с напряжением  $U_{i0}$ , соответствующим заданному значению

тока. Разностный сигнал после усиления по мощности используется для управления сигнализатором предельных значений вылета и исполнительным двигателем. Последний через редуктор перемещает токоподводящий мундштук вверх или вниз до тех пор, пока сварочный ток не станет равным установленному. При этом сигнал на входе усилителя мощности станет равным нулю и система придет в состояние равновесия. Использование обратной связи по току позволяет обеспечить его стабилизацию, независимо от вида возмущений, нарушающих установленный режим сварки. Однако стабилизация вылета электрода в данном случае обеспечивается только при условии строгого постоянства скорости подачи, поперечного сечения электродной проволоки и применении стабилизированного источника питания.

## **2.6. Системы управления формированием и геометрическими размерами швов**

Стабилизация энергетических параметров дуги (см. § 2.4, 2.5) во многом предопределяет условия обеспечения заданного качества сварного соединения, однако весь комплекс возмущений, действующих непосредственно на свариваемое изделие, остается вне контура управления и не влияет на выработку регулирующего воздействия. В связи с этим для нормального формирования сварного шва и обеспечения заданных параметров его поперечного сечения при использовании автоматов для дуговой сварки необходимо предъявлять гораздо более жесткие требования к точности подготовки и сборки изделий, чем при ручной или полуавтоматической сварке. Стабилизация основных параметров режима позволяет обеспечить достаточно малые отклонения величины погонной энергии дуги от расчетной. При изменении ширины зазора угла разделки кромок, притупления, температуры предварительного подогрева и других технологических возмущениях можно решить качественно более сложную задачу — управлять параметрами режима дуговой сварки, чтобы получать заданную геометрию сварного шва. При этом необходимо учитывать, что изменение погонной энергии, достаточное для управления термическими циклами при дуговой сварке, недостаточно для управления формой шва, так как ток, скорость перемещения и напряжение дуги по-разному влияют на форму шва при неизменной погонной энергии.

Факторы, влияющие на форму и размеры сварного шва, можно разделить на две группы:

а) исходные технологические условия — толщина  $S$  металла или катет углового шва, зазор  $b$  между свариваемыми деталями, диаметр электродной проволоки  $d_э$ ;

б) управляемые параметры режима сварки — напряжение дуги  $U_д$ , скорость сварки  $V_{св}$ , скорость подачи проволоки  $V_п$ , сварочный ток  $I_{св}$ .

Допустимый диапазон изменения геометрических размеров шва в зависимости от типа соединения и толщины свариваемого металла задается соответствующими стандартами (например, для сварки в защитных газах — ГОСТ 14771—76). Управление процессом сварки может быть сведено к определению по исходным технологическим условиям

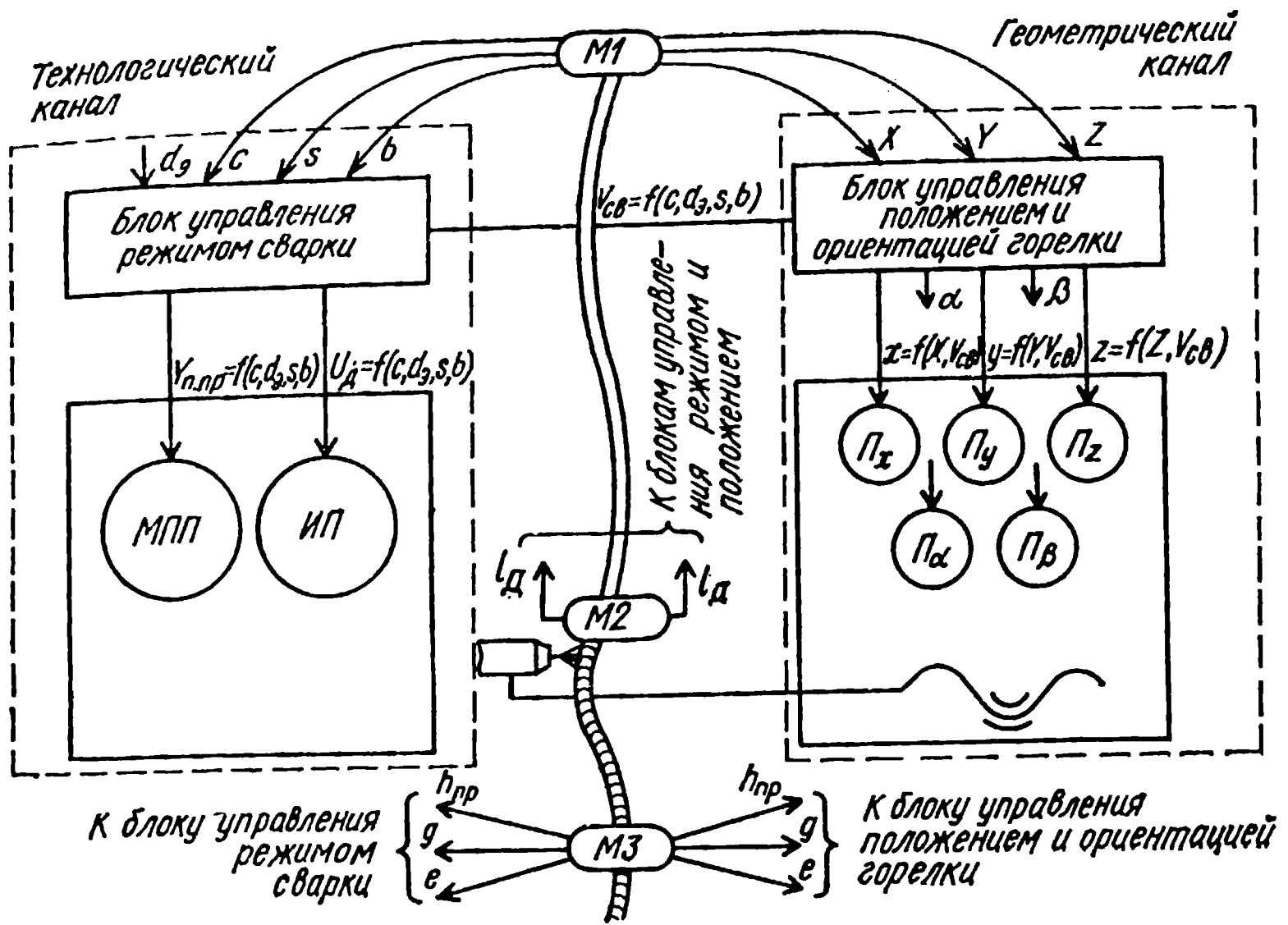


Рис. 2.29. Функциональная схема управления формированием шва:

$X, Y, Z$  — координаты положения линии сварного соединения;  $x, y, z, \alpha, \beta$  — сигналы управления приводами  $P_x, P_y, P_z, P_\alpha, P_\beta$  положения и ориентации сварочного органа;  $l_d$  — длина дуги;  $c$  — вид соединения

(группа факторов «а») таких параметров режима (группа факторов «б»), которые обеспечивают получение шва заданных размеров и формы при максимальной производительности процесса и минимальных затратах сварочных материалов.

Решение этой задачи возможно на основе применения в системах управления математических моделей, например,  $M1, M2$  и  $M3$  (рис. 2.29), устанавливающих зависимость управляемых показателей процесса сварки от следующих входных параметров: исходные технологические условия и параметры режима сварки (для  $M1$ ); параметры дуги (для  $M2$ ) и размеры шва или сварочной ванны (для  $M3$ ) соответственно [41]. Система управления с этими моделями содержит геометрический канал, определяющий перемещения дуги как источника нагрева относительно линии сварного соединения, и технологический канал, предназначенный для поддержания оптимальной взаимосвязи между управляемыми параметрами при наличии возмущений. Связь между каналами осуществляется через скорость сварки  $V_{св}$ . Модели типа  $M1$ , устанавливающие корреляционную зависимость геометрических размеров сварочной ванны от технологических условий и параметров сварочного режима, получают методами, основанными на теории принятия решений. Эти модели, например для сварки низкоуглеродистых сталей в среде углекислого газа, представляются уравнениями регрессии вида

$$Y = \theta_0 + \theta_1 V_{п} + \theta_2 U_{д} + \theta_3 V_{св} + \theta_4 d_3 + \theta_5 V_{п} U_{д} + \theta_6 V_{п} V_{св} + \theta_7 U_{д} V_{св} + \theta_8 V_{п} d_3 + \theta_9 U_{д} d_3 + \theta_{10} V_{св} d_3 + \theta_{11} V_{п}^2 + \theta_{12} U_{д}^2 + \theta_{13} V_{св}^2 + \theta_{14} d_3^2,$$

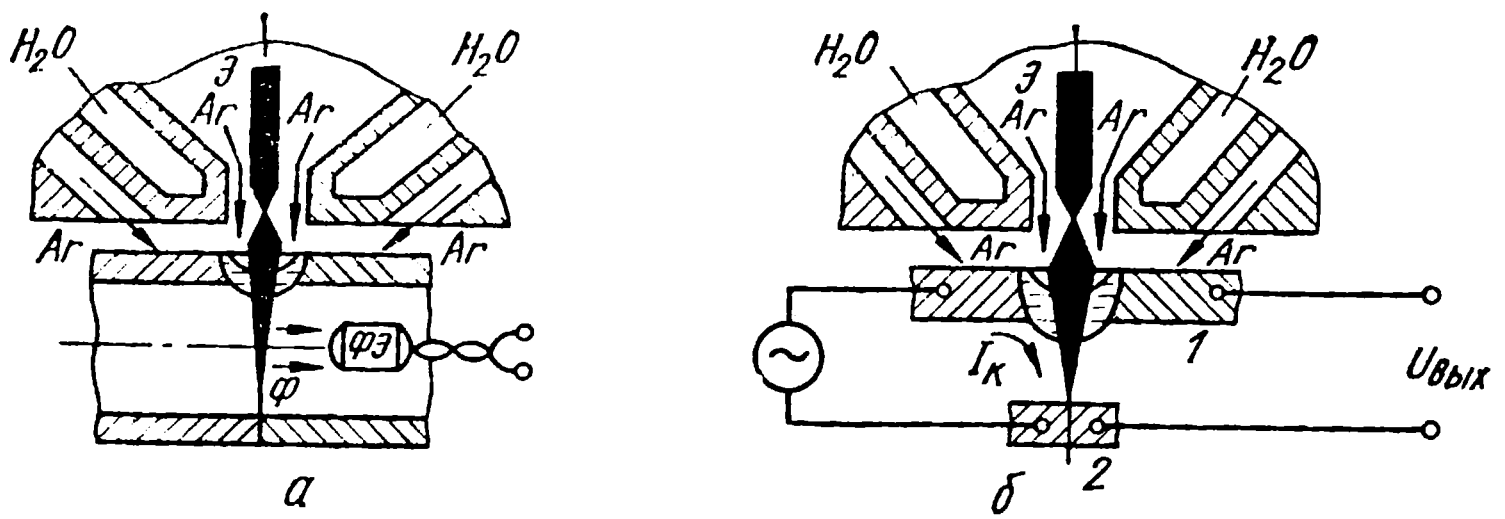


Рис. 2.30. Способы контроля проплавления при плазменной сварке

где  $U$  — один из характерных размеров поперечного сечения шва;  $\theta_0$ — $\theta_{14}$  — коэффициенты, полученные для каждого из параметров  $U$  по результатам обработки экспериментальных данных методами многомерного анализа.

На основе уравнений регрессии рассчитывают оптимальные режимы сварки, обеспечивающие требуемые геометрические размеры и формы швов. Задача решается численными методами с использованием весовых и штрафных функций отдельно для каждого сочетания толщины пластин (или катета для угловых швов), диаметра электродной проволоки и величины зазора. В результате получают интерполяционные модели вида [8]

$$Z = \theta_0 + \theta_1 S + \theta_2 b + \theta_3 d_э + \theta_4 S b + \theta_5 S d_э + \theta_6 b d_э + \theta_7 S^2 + \theta_8 b^2 + \theta_9 d_э^2,$$

где  $Z$  — один из регулируемых параметров  $I_{св}$ ,  $V_{п}$ ,  $U_{д}$  или  $V_{св}$  соответственно;  $\theta_0$ — $\theta_9$  — коэффициенты, имеющие самостоятельные значения для каждого из регулируемых параметров  $Z$ .

Эти уравнения позволяют определять оптимальный сварочный режим по исходным технологическим параметрам с помощью номограмм, таблиц или специальных счетных линеек.

Применение в системах управления вычислительных устройств для расчета на основе моделей типа  $M1$  значений параметров сварочного режима (по данным текущего контроля соответствующими датчиками исходных технологических параметров) позволит создать замкнутые САР, которые обеспечат стабилизацию формы и геометрических параметров поперечного сечения шва при сварке соединений с переменным зазором и меняющейся толщиной деталей.

Создание моделей типа  $M3$  позволит корректировать параметры сварочного процесса для стабилизации ширины шва или глубины проплавления.

Совместное использование в САУ моделей типов  $M1$ ,  $M2$  и  $M3$  для коррекции работы исполнительных устройств геометрического и технологического каналов системы (см. рис. 2.29) на основании исходной и текущей информации о параметрах, определяющих условия сварки, наиболее полно отвечает требованиям ее полной автоматизации.

Частное решение общей задачи управления размерами сварных швов — автоматическое регулирование глубины проплавления тонко-



го металла, например при плазменной сварке [15]. Проплавление контролируют либо с помощью фотодатчика ФЭ (рис. 2.30, а), регистрирующего интенсивность потока ионизированных газов с обратной стороны шва, либо использованием специальной подложки 2 (рис. 2.30, б), вводимой под изделие 1 и служащей для замыкания потоком ионизированных газов электрической цепи. Сигналы датчиков используют для стабилизации проплавления, изменяя сварочный ток, амплитуду поперечных колебаний электрода, скорость сварки и т.д.

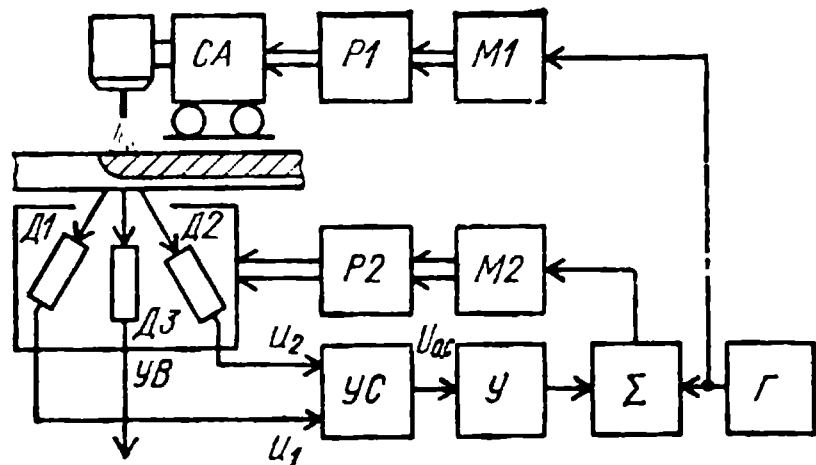


Рис. 2.31. Система поиска точки визирования

Методы контроля глубины проплавления чаще всего основаны на измерении температуры в максимально нагретой точке с обратной стороны свариваемого изделия. Для этого применяются специальные системы управления положением датчика температуры с целью поиска точки визирования. Пример такой системы показан на рис. 2.31. Устройство визирования  $УВ$  состоит из трех бесконтактных датчиков температуры  $Д1—Д3$ . Точки визирования датчиков  $Д1$  и  $Д2$  расположены на одинаковом расстоянии от точки визирования датчика  $Д3$ . Сигналы с  $Д1$  и  $Д2$  поступают на устройство сравнения  $УС$ ; разность между ними усиливается усилителем  $У$ . Полученное напряжение суммируется с напряжением генератора  $Г$ , питающего двигатель  $М1$  механизма перемещения сварочного аппарата  $СА$  и двигатель  $М2$  коррекции устройства визирования. Разница в скорости перемещения  $УВ$  и сварочной дуги преобразуется в напряжение обратной связи  $u_{обс}$ . Система поиска работает таким образом, что, если сигнал датчика  $Д1$  больше сигнала датчика  $Д2$ , двигатель  $М2$  через редуктор  $Р2$  перемещает  $УВ$  влево относительно дуги и, наоборот, если сигнал  $Д2$  больше сигнала  $Д1$ , то  $УВ$  смещается вправо относительно дуги. Предполагается, что наиболее нагретая точка находится между точками визирования  $Д1$  и  $Д2$ ; ее температура измеряется датчиком  $Д3$ .

Рассмотренная система является системой однокоординатного поиска, т. е. предполагается, что наиболее нагретая точка находится в плоскости стыка. Там, где априорно это предположить нельзя, применяют двухкоординатную систему, осуществляющую поиск также и в плоскости, перпендикулярной к плоскости стыка. Ошибка этой системы пропорциональна расстоянию между точками визирования датчиков  $Д1$  и  $Д2$ , так как максимум температур может быть смещен в сторону от середины.

Чтобы измерить температуру нагрева свариваемых заготовок или тепловое излучение с их поверхности, можно использовать бесконтактные датчики температуры (теплового излучения), например тепловизоры (см. прил. 8).

## 2.7. Автоматизация управления положением сварочной горелки при сварке и наплавке

Для автоматического управления положением сварочной горелки (электрода) относительно свариваемого изделия или наплавляемой поверхности предложено большое количество разнообразных следящих систем, однако в промышленности они применяются недостаточно широко. Это объясняется главным образом отсутствием или малой надежностью датчиков, пригодных для условий сварочного производства. Можно считать, что автоматизация сварочных операций с помощью следящих систем — это проблема способов и средств измерения фактического положения стыка или наплавляемой поверхности для каждого экземпляра изделия.

По способу преобразования информации в сигнал, используемый для управления, следящие системы можно классифицировать по типам применяемых в них датчиков. Различают следящие системы с датчиками: электромеханическими, фотоэлектрическими, телевизионными, электроразрядными, электромагнитными, фотопирометрическими, ультразвуковыми, пневматическими, радиационными и др.

По способу получения информации о положении контролируемого объекта различают две группы датчиков:

а) датчики, в которых информация образуется в результате смещения контролируемого объекта относительно чувствительного элемента датчика с реально наблюдаемой скоростью;

б) датчики, в которых информация образуется при быстром просматривании (сканировании) зоны контролируемого объекта чувствительным элементом датчика со скоростью, превышающей не менее, чем на порядок, скорость реального смещения объекта.

Датчики со сканированием конструктивно сложнее датчиков первой группы, однако они могут быть изготовлены более помехозащищенными и позволяют получать большой объем информации об объекте измерения.

В зависимости от места точки измерения положения линии соединения свариваемых элементов различают датчики и системы с измерением впереди точки сварки (рис. 2.32, а, в, г), сбоку от точки сварки (рис. 2.32, б) и в точке сварки. В зависимости от наличия запоминающих устройств в следящей системе различают системы без учета транспортного запаздывания точки сварки относительно точки измерения (рис. 2.32, а) и системы с учетом указанного транспортного запаздывания (рис. 2.32, в, г).

В системе, выполненной по схеме рис. 2.32, а, возникает погрешность наведения горелки на линию сопряжения свариваемых элементов. Эта погрешность отсутствует в системах с измерением сбоку от точки сварки (рис. 2.32, б), в точке сварки, а также в системах с учетом транспортного запаздывания (рис. 2.32, в, г). Последние бывают двух видов: с абсолютным определением положения линии сопряжения в точке измерения (рис. 2.32, в) и с относительным определением положения линии сопряжения в точке измерения (относительно точки сварки). В первом случае абсолютное положение датчика линии сопряжения измеряется вспомогательным датчиком — преобразователем

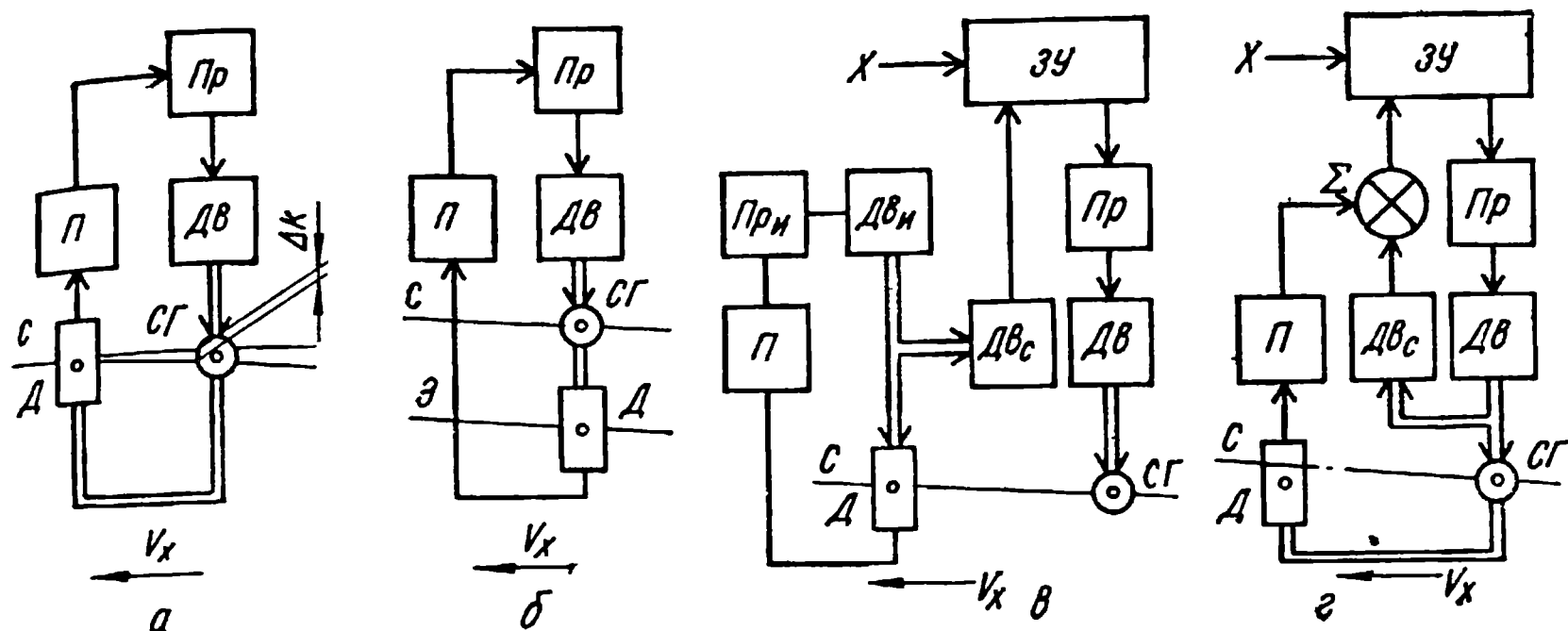


Рис. 2.32. Схемы следящих систем для управления положением сварочной горелки:

а — с датчиком впереди точки сварки; б — с датчиком сбоку от точки сварки; в — с датчиком впереди точки сварки, запоминающим устройством и независимой измерительной следящей системой; г — то же с зависимой (закрепленной неподвижно относительно сварочной горелки) измерительной системой; СГ — сварочная горелка; Д — датчик положения линии соединения (С) или линии (поверхности), эквидистантной линии соединения (Э); П — преобразователь датчика; Пр — привод перемещения сварочной горелки; Дв — исполнительный двигатель привода сварочной горелки; Пр<sub>н</sub> — привод измерительной следящей системы; Дв<sub>н</sub> — исполнительный двигатель привода измерительной следящей системы; Дв<sub>с</sub> — датчик положения вспомогательный; ЗУ — запоминающее устройство; Σ — суммирующее устройство; V<sub>х</sub> — направление скорости перемещения сварочной горелки при неработающей следящей системе; → — кинематические связи

Дв<sub>с</sub> и поступает в запоминающее устройство. Во втором случае определяется отклонение линии соединения в точке измерения относительно точки сварки и это отклонение складывается с текущим положением сварочной горелки. Полученная алгебраическая сумма, определяющая абсолютное положение точки измерения, поступает в запоминающее устройство. В обоих видах систем информация о положении точки измерения используется для управления положением сварочной горелки с задержкой по времени, определяемой временем перемещения на скорости V<sub>х</sub> в направлении X на расстояние между точкой сварки и точкой измерения. Скорость V<sub>х</sub> настраивается в соответствии с требованием технологии, а информация о перемещении по координате X поступает в узел управления запоминающего устройства для управления темпом выдачи информации на привод сварочной горелки.

Применительно к задаче автоматического управления положением сварочной горелки (электрода) относительно линии свариваемого соединения для отсчета ее положения на изделии можно использовать стык свариваемых кромок, кромки (поверхности) изделия или специальную копирную линию (см. прил. 9).

Определив, какой элемент стыка будет использоваться для отсчета его положения на изделии, необходимо найти характеристики входного воздействия: наибольшее значение рассогласования между расчетным и фактическим положением линии соединения или поверхностей изделия; наибольшую скорость изменения этого рассогласования. Эти данные позволяют определить требуемое значение и наибольшую скорость перемещения датчика и сварочного инструмента вдоль соответствующих координат.

Для реальных условий сварки значения этих величин определяются действием случайных факторов: погрешностями изготовления свариваемых элементов изделия, погрешностями их сборки под сварку,

погрешностями установки собранного изделия в положении сварки, тепловыми и сварочными деформациями изделия в процессе сварки.

При сварке швов, не имеющих резких изгибов и изломов, следящие системы, кроме их принципиальной работоспособности и устойчивости, должны обладать определенными динамическими свойствами, которые оцениваются с помощью показателей качества регулирования: величины перерегулирования  $\sigma$ , времени регулирования  $t_p$  и числа колебаний  $\mu$ , совершаемых системой за время переходного процесса. Практика показывает, что для большинства случаев сварки достаточно, чтобы следящая система обладала следующими показателями качества:  $\sigma \leq 20 \div 30 \%$ ;  $t_p = 0,2 \div 0,6$  с и  $\mu = 0 \div 2$ .

По числу следящих движений системы можно разделить на однокоординатные и многокоординатные. Количество отслеживаемых координат определяется характером линий, образуемых на плоскости или в пространстве стыкуемыми кромками будущего шва и его ориентацией относительно координатных осей: прямая линия; прямая, расположенная под небольшим углом к линии движения сварочного аппарата; круговая; спиральная и т. п. Двухкоординатные следящие системы обычно представляют собой сочетание двух независимых однокоординатных систем с общим двухкоординатным или двумя однокоординатными датчиками. При сварке швов сложной формы применяются также двух- и трехкоординатные следящие системы с взаимозависимыми следящими движениями.

По типу регулятора, примененного в системе автоматки, следящие системы разделяются на две группы: системы с регуляторами прямого действия и системы с регуляторами непрямого действия.

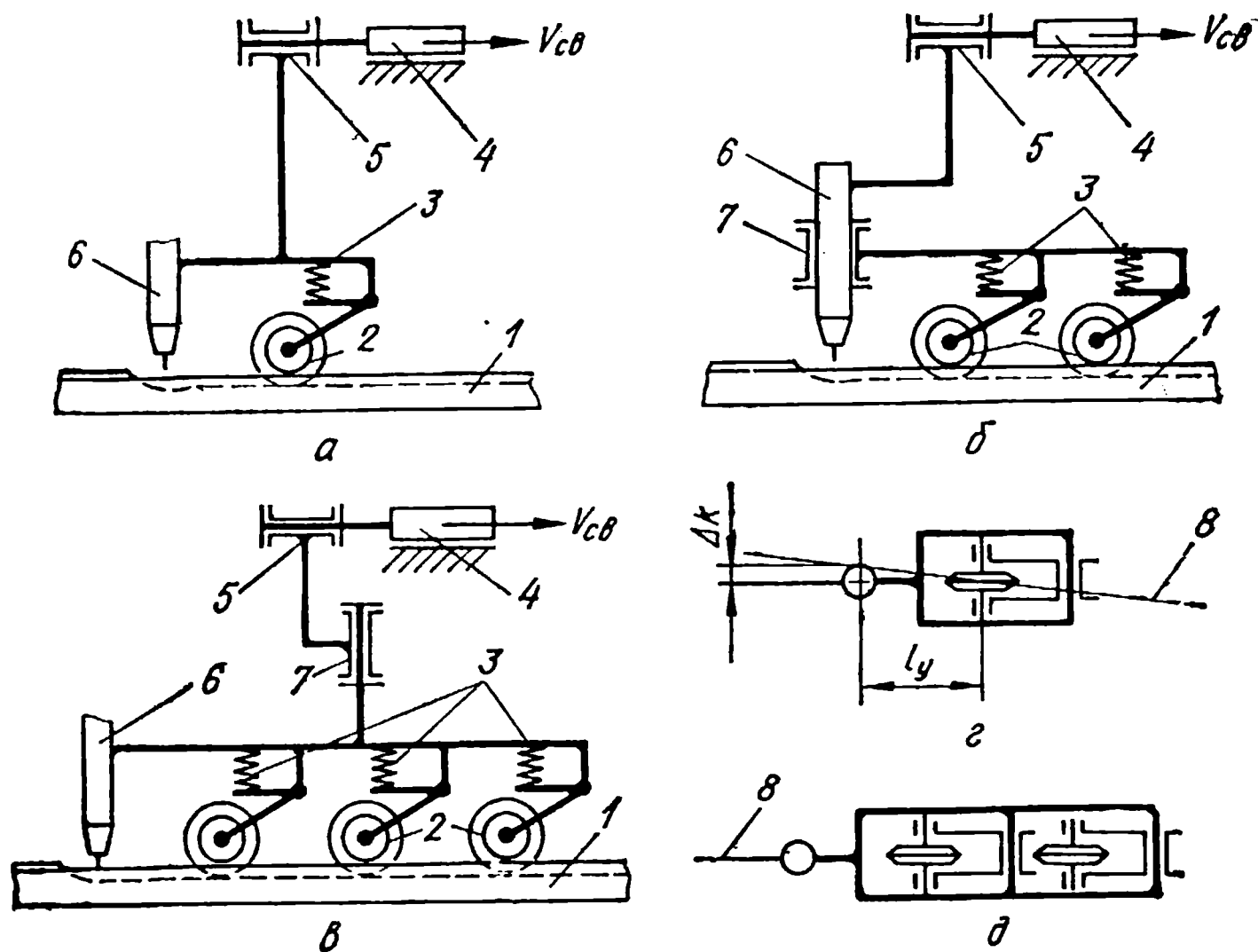


Рис. 2.33. Схемы устройств прямого действия для направления сварочного инструмента по линии соединения:

1 — свариваемое изделие; 2 — копирный ролик; 3 — пружина; 4 — звено, перемещающееся вдоль линии соединения; 5 — подвижность, обеспечивающая корректировочное перемещение; 6 — сварочная горелка; 7 — дополнительная подвижность; 8 — линия соединения

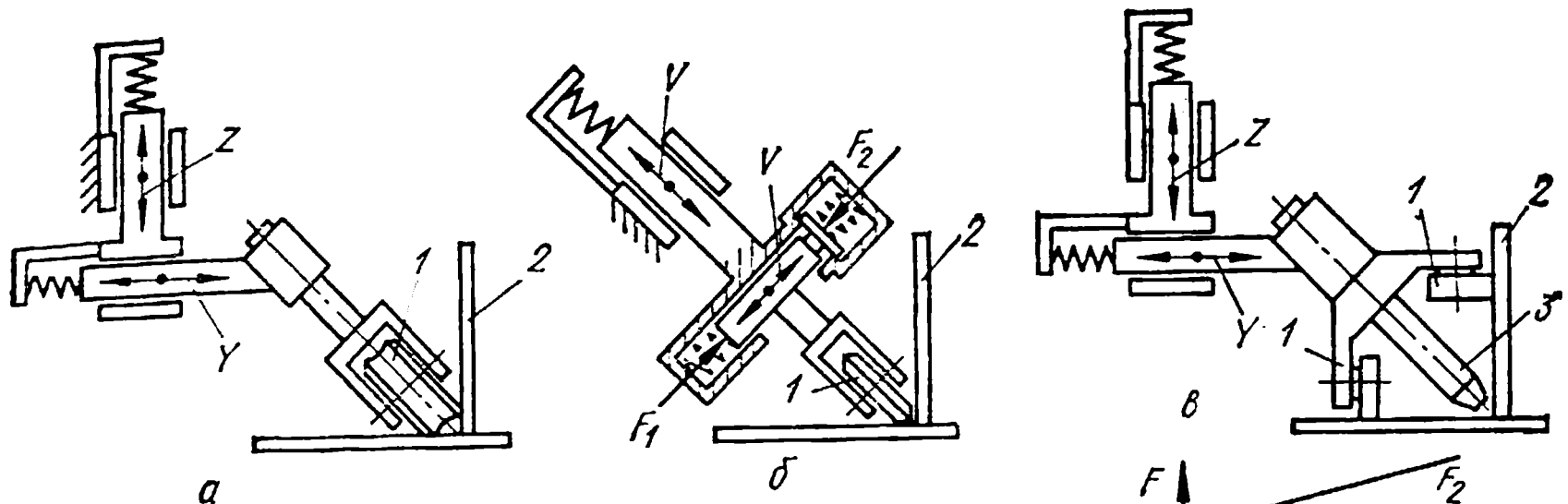


Рис. 2.34. Схемы двухкоординатных устройств прямого действия для сварки угловых швов:  
1 — копирный ролик; 2 — свариваемое изделие; 3 — сварочная горелка

Следящие системы (устройства) с регуляторами прямого действия. Они наиболее простые, измерение неотделимо от управления. Сварочная головка или горелка имеет одну или несколько свободных (неприводных) подвижностей и связана непосредственно со щупом, выполненным в виде ролика или неподвижного копирного пальца. Щуп постоянно прижат к поверхностям разделки кромок стыка или другим поверхностям свариваемых элементов под действием пружин или сил тяжести. При одном щупе-ролике (рис. 2.33, а) возможно направление горелки по разделке стыка без прихваток.

Если сварочная горелка и щуп имеют только одну подвижность (рис. 2.33, а), то возникает составляющая погрешности наложения шва  $\Delta_k$  (рис. 2.33, г), определяемая по формуле (9) (см. прил. 9).

При копировании в двух (и более) точках и дополнительной подвижности щупа относительно горелки (рис. 2.33, б) или щупа с горелкой относительно изделия (рис. 2.33, в) можно существенно уменьшить величину погрешности  $\Delta_k$ , а при строго прямолинейных стыках, случайным образом повернутых на небольшой угол, — полностью исключить эту погрешность (рис. 2.33, д). Для того чтобы при этой дополнительной подвижности можно было копировать стыки, собранные с помощью прихваток, необходимо не менее трех щупов-роликов с независимым поджатием к изделию (рис. 2.33, в).

Устройства, схемы которых приведены на рис. 2.33, применяются при сварке преимущественно стыковых соединений с разделкой или гарантированным зазором, собранных без прихваток или на прихватках. При выполнении угловых швов эти устройства применяются при сварке в положении «в лодочку». При этом требуется также копирование по второй координате, которое осуществляется с помощью дополнительной системы с регулятором непрямого действия.

При сварке «в угол» корректирующие перемещения могут быть направлены либо поперек и вдоль оси электрода, либо быть перпендикулярны к полкам свариваемого соединения (рис. 2.34).

Прямое копирование по вертикали и под большими углами к горизонтали применяют при небольшой или частично уравновешенной массе перемещаемых частей (рис. 2.34, а).



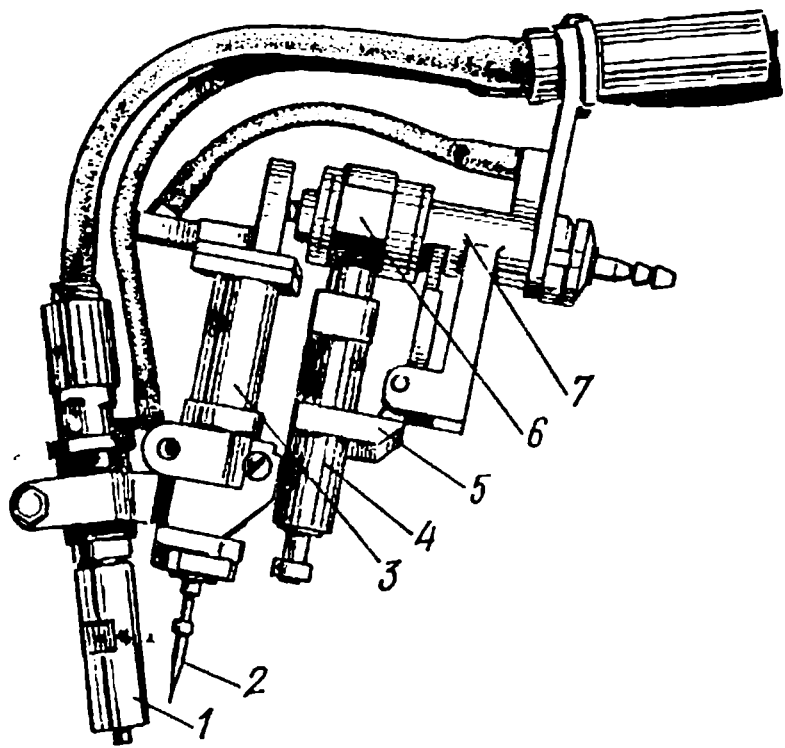


Рис. 2.35. Устройство периодического прямого копирования для текущей адаптации: 1 — горелка; 2 — щуп; 3 — пневмоцилиндр выдвижения щупа; 4 — ползун перемещения горелки вдоль электрода; 5 — фиксатор горелки; 6 — втулка, обеспечивающая качание горелки поперек оси электрода; 7 — пневмоцилиндр привода фиксатора

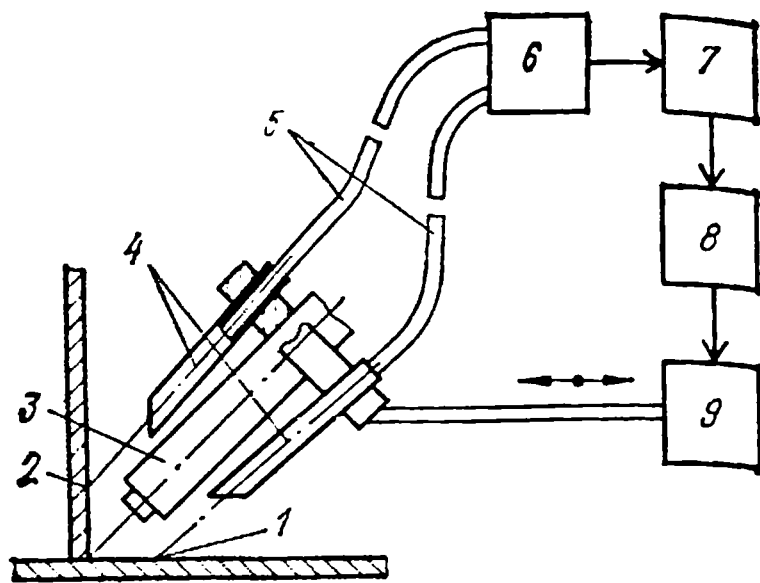


Рис. 2.36. Схема сенсорной подсистемы, использующей отраженное световое излучение сварочной дуги (подсистема изображена в составе однокоординатной корректирующей системы):

1, 2 — точки визирования на горизонтальном и вертикальном свариваемых элементах; 3 — сварочная горелка; 4 — трубчатые бленды; 5 — кабельные световоды; 6 — датчик с двумя фоторезисторами; 7 — усилитель-формирователь; 8 — преобразователь привода; 9 — двигатель и приводной механизм

В схеме по рис. 2.34, б копирный ролик 1 под действием пружин, создающих силы  $F_1$  и  $F_2$ , занимает строго нейтральное положение (до соприкосновения с изделием). Это достигается благодаря тому, что сила  $F_2$  прижимает к уступу корпуса упорную шайбу, а сила  $F_1$  меньшая, чем сила  $F_2$ , прижимает к этой же шайбе подвижный элемент, жестко связанный с копирным роликом. Чтобы усилия, требуемые для смещения ролика из нейтрального положения в обе стороны, были равны, необходимо обеспечить в нейтральном положении выполнение условия:  $F_2 = 2F_1$  (без учета силы тяжести подвижных частей) — рис. 2.34, г.

Схема по рис. 2.34, в позволяет реализовать прямое копирование поверхностей изделия в точках, расположенных сбоку (на траверсе) точки сварки, что наиболее просто осуществить при выполнении угловых швов с достаточно большими полками.

В последние годы начали применять одно- и двухкоординатные копирующие устройства прямого действия с периодическим копированием. Точка копирования устройства (рис. 2.35) расположена на расстоянии 8—10 мм от точки сварки. В качестве щупа используется клиновидный палец. Цикл корректировки положения сварочного инструмента состоит из освобождения фиксатора горелки по двум степеням подвижности: одна — вдоль оси электрода; вторая — поперек оси электрода и линии соединения; затем движения щупа до упора в поверхности свариваемых элементов, последующей фиксации инструмента, а затем отвода щупа от изделия на расстояние  $\approx 20$  мм. Приводы механизмов перемещения щупа и фиксации инструмента — пневматические. Первый цикл корректировки выполняется до начала сварки. Частота следования циклов корректировки и положение точек копирования на линии соединения устанавливаются в зависимости от ожидаемой скорости изменения рассогласования между расчетным и фактическим положениями линии соединения, кривизны последней, допустимого отклонения сварочного инструмента от ли-

нии соединения, а также от расположения прихваток. Поскольку щуп в каждом цикле корректировки находится вблизи зоны сварки в течение до одной секунды, то он практически не забрызгивается и не нагревается. Еще более благоприятные условия применения такого устройства обеспечиваются при сварке пульсирующей дугой, когда корректировка может осуществляться во время прерывания дуги. Наиболее удобно применять такие устройства при сварке угловых швов небольшой кривизны без прихваток или с прихватками, расположенными в точно определенных местах (между точками срабатывания устройства).

Недостатки регуляторов прямого действия: 1) невозможность их применения при сварке стыковых соединений без разделки и гарантированного зазора в стыке, а также нахлесточных соединений с толщиной верхнего листа менее 3 мм; 2) необходимость специальной конструкции сварочного аппарата «с плавающей» в направлении слежения частью, несущей сварочную горелку; 3) при невозможности копирования сбоку точки сварки и нецелесообразности применения планок для вывода щупа необходимо предусматривать фиксацию «плавающей» части аппарата перед выходом щупа из контакта с изделием при наложении конечного участка шва, а также обеспечивать достаточно высокую жесткость конструкции всей манипуляционной системы, чтобы снятие усилия копирования после выхода щупа из контакта с изделием не вызывало чрезмерного дополнительного смещения сварочной горелки из зафиксированного перед этим положения.

От указанных недостатков свободны следующие системы с регуляторами непрямого действия.

**Следящие системы с регуляторами непрямого действия.** Этим системам присуще разнообразие способов преобразования информации, полученной от датчика, в сигнал, используемый для управления положением сварочной горелки. Среди таких систем большую группу образуют следящие системы с электромеханическими датчиками. Основная особенность электромеханических датчиков — наличие в них копирующего элемента — щупа, который под действием пружин или сил тяжести находится в контакте с копируемыми поверхностями или кромками изделия. Точка копирования может находиться перед точкой сварки или сбоку от нее (см. прил. 10).

Достоинства электромеханических датчиков с разными преобразователями — достаточно высокая точность измерения, наглядность контроля за правильностью функционирования датчика и высокая надежность. Однако при кинематических связях изделий с преобразователями практически невозможно использовать датчики этих типов на соединениях, подготовленных под сварку с прихватками, значительно усложняются конструкции датчиков. В частности приходится принимать меры для защиты их от поломок при нарушении требований к поверхностям изделий в зоне слежения, ошибочных действиях оператора или сбоях в работе системы управления сварочным оборудованием. Кроме того, попадание под щуп частиц флюса, шлака и брызг металла, а также случайные отклонения геометрических параметров соединения, подготовленного под сварку, — это источники дополнительных погрешностей такой следящей системы. Необходимо

также обеспечивать защиту щупа от налипания брызг расплавленного металла при сварке. Следящие системы с электромеханическими датчиками целесообразно применять в следующих областях: сварка стыковых соединений (только с разделкой), нахлесточных и угловых соединений (с внешней стороны угла) без прихваток и протексов металла с другой стороны; сварка тавровых соединений независимо от наличия прихваток. Во всех случаях глубина разделки или высота копируемого уступа должна быть не менее 3 мм.

От недостатков, присущих системам с кинематической связью (через щуп, ролик и т. д.) между изделием и сварочной головкой, свободны следящие системы с фотоэлектрическими, телевизионными, электромагнитными и другими измерительными преобразователями.

**Следящие системы с фотоэлектрическими датчиками.** Датчики этих систем можно отнести к группе так называемых видеосенсоров. Сигнал управления возникает при смещении датчика относительно контрастной линии, границ отражающих или излучающих поверхностей и экранирующих элементов.

Так, известны системы, где для отсчета при измерении положения стыка используется: линия этого стыка, контрастная относительно поверхности свариваемого металла, либо специальная контрастная копирная линия (полоса), нанесенная на поверхности изделия при постоянном расстоянии от линии стыка; граница «черное-белое» на копирной ленте, наклеиваемой на изделие; линия, разделяющая поверхности изделия с разной отражательной способностью, например, при сварке встык двух листов, поверхность одного из которых или зачищена до металлического блеска, или окрашена. Возможно также использование для отсчета зазора или кромки изделия, подсвечиваемых со стороны, обратной расположению датчика. В последнее время разрабатываются следящие системы, в которых измеряется положение разогретых кромок или зоны прогрева с обратной стороны соединения, излучающих поток в световом диапазоне. Разрабатываются фотоэлектрические системы, измеряющие фактическое положение электрода, контрастного относительно окружающего фона (см. прил. 11).

Применение фотоэлектрических датчиков может быть основано на использовании отраженного света излучения дуги, например при сварке в защитных газах угловых швов. При направлении дуги строго по биссектрисе угла (рис. 2.36) среднестатистическая освещенность в точках 1 и 2, выбранных на некотором одинаковом удалении от угла, одинакова. При смещении дуги на один из свариваемых элементов точки 1 и 2 освещаются неравномерно. Величина освещенности воспринимается двумя фоторезисторами, размещенными в корпусе датчика 6. Недостаток системы — невозможность автоматизации процесса выхода на шов до начала сварки. Кроме того, недостаток этой и других систем, измеряющих освещенность поверхностей изделия, — зависимость выходного сигнала от состояния поверхностей свариваемых элементов и, следовательно, коэффициента отражения, который может существенно изменяться от изделия к изделию и в пределах одного изделия.

Перспективным является применение видеосенсоров, в которых в качестве осветителей используют лазеры, а в качестве чувствитель-

ных элементов — преобразователи типа матриц и линеек фотоприемников, позволяющих в сочетании с триангуляционным способом измерения получить с помощью средств вычислительной техники информацию не только о положении, но и о геометрических параметрах соединения: превышении кромок, сечения разделки и т. д.

Следящие системы с телевизионными датчиками. Они относятся к наиболее современным и перспективным, создаются на базе прикладных (промышленных) телевизионных установок (ПТУ) замкнутого типа. Так, в трубосварочном производстве впервые широко применили серийные ПТУ при сварке внутренних швов прямошовных труб диаметром 1220—1620 мм [30]. Внедрение ПТУ на аппаратах для трехдуговой сварки под флюсом труб на токах до 1000 А в каждой дуге оказалось возможным, так как тщательно были выполнены требования по защите аппаратуры и линий связи ПТУ от электромагнитных помех [4], защите передающей камеры от нагрева теплом сварочной дуги и свариваемого изделия, предохранению оптики передающей камеры от газов, выделяемых при сварке, и от пыли.

Для реализации телевизионного слежения так же, как и дистанционного наблюдения, необходимо, чтобы наблюдаемая часть объекта содержала светоконтрастные элементы, подобные тем, которые применяются для фотоэлектрических систем. При использовании телевизионного слежения значительные трудности создаются световыми помехами, в частности, в виде светоконтрастных царапин, рисок, бликов и т. п., которые в реальных условиях могут появляться в поле зрения передающей камеры и быть причиной ложных сигналов, а также нестабильностью во времени освещенности наблюдаемых объектов, прежде всего, переменным световым излучением дуги (при сварке в защитных газах и без защиты дуги).

Телевизионные следящие системы для сварочного производства в зависимости от способа получения информации о положении изображения линии (полосы, границы) на светочувствительном слое передающей трубки можно отнести к одной из двух групп: а) времяимпульсные системы; б) системы с определением положения контрастного элемента по току развертки. В обоих случаях измерения могут осуществляться вдоль направления как строчной, так и кадровой развертки (см. прил. 12).

Если необходимые для работы фотоэлектрических и телевизионных систем светоконтрастные элементы на поверхности изделия отсутствуют, то применяют специальные способы освещения и выделения информации о положении линии соединения. Так, при сварке угловых швов тавровых соединений проектор с мощной ксеноновой лампой освещает зону соединения под углом  $65^\circ$  (рис. 2.37) к горизонтали, а видеосенсор направлен на эту же зону под углом  $45^\circ$ . За счет разных углов падения светового потока на вертикальный и горизонтальный свариваемые элементы их освещенность оказывается различной. В качестве фотоприемника используют полупроводниковую светочувствительную матрицу с количеством элементов  $50 \times 50$ . С элементов матрицы получают аналоговый сигнал, пропорциональный освещенности, который затем конвертируется в четырехбитовый цифровой сигнал (уровни освещенности 0—15). Этот сигнал поступает в микроЭВМ,

Рис. 2.37. Схема определения положения линии таврового соединения с помощью видеосенсора: 1 — линия соединения свариваемых элементов; 2 — зона видимости; 3 — зона освещения; 4 — осветитель; 5 — изображение линии соединений на видеоконтрольном устройстве; 6 — освещенность зоны видимости; 7 — корпус фотоприемника; 8 — проектор перемещающегося светового пятна

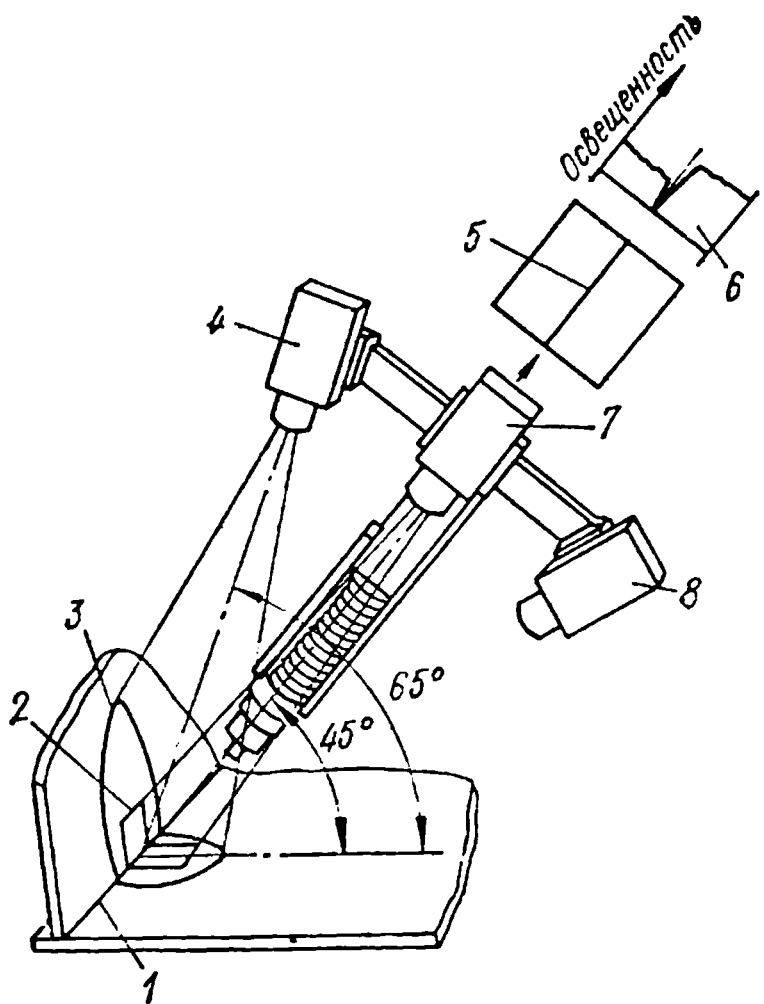
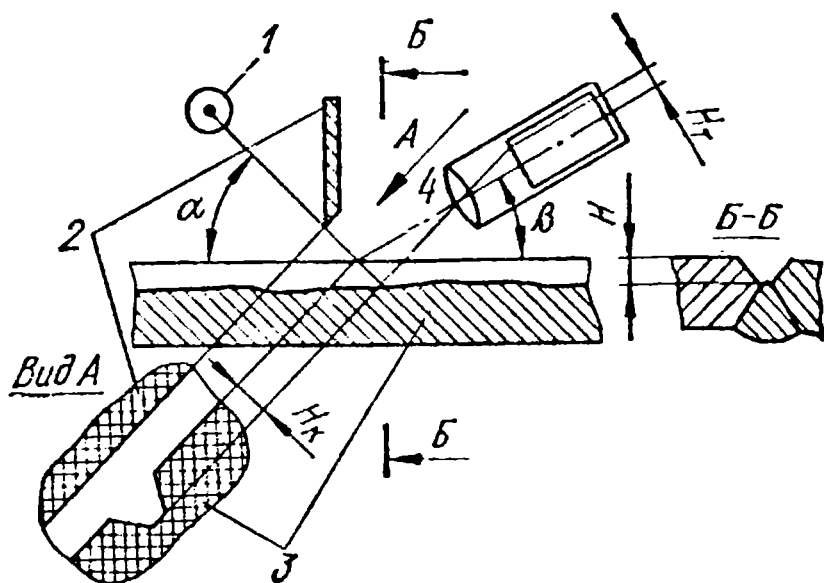


Рис. 2.38. Метод светового сечения. Схема устройства



которая его обрабатывает и выдает информацию для корректировки программы. Чтобы определить положения начала и конца шва, в зону наблюдения проектируется точка диаметром 3 мм. Появление точки в определенном месте зоны наблюдения свидетельствует о наличии шва под сенсором, а ее исчезновение — о проходе конца шва под сенсором. Эта информация используется для включения и выключения сварки.

Рассмотрим еще пример, когда светоконтрастные элементы на поверхности изделия отсутствуют — сварка стыковых соединений с двухсторонней разделкой. Во время сварки на одной стороне происходит потемнение поверхностей разделки с противоположной стороны и они становятся неконтрастными относительно прилегающих поверхностей изделия. Тогда видеосенсоры используют в сочетании со световым сечением и триангуляционным методом измерения. В простейшем случае (рис. 2.38) световой поток от осветителя 1 с прямолинейным светящимся телом, расположенным параллельно поверхности изделия, частично экранируется шторкой 2, расположенной на расстоянии 10—15 мм от поверхности изделия 3. Как видно из рис. 2.38, высота изображения разделки, проецируемого при этом на светочувствительную поверхность передающей трубки 4, определяется соотношением

$$H_T = k \frac{H}{\sin \alpha} \sin (\alpha + \beta),$$

где  $H$  — глубина разделки;  $\alpha$  — угол, под которым тень от шторки падает на поверхность изделия;  $\beta$  — угол наблюдения;  $k$  — коэффициент оптического увеличения.

Наибольшее увеличение при данном  $\alpha$  получается, если  $\alpha + \beta = 90^\circ$ . Сигнал передающей трубки 4, преобразованный в изображение стыка на экране видеоконтрольного устройства, позволяет отчетливо различать и при необходимости измерять следующие геометрические параметры: площадь сечения разделки; зазор или расстояние между



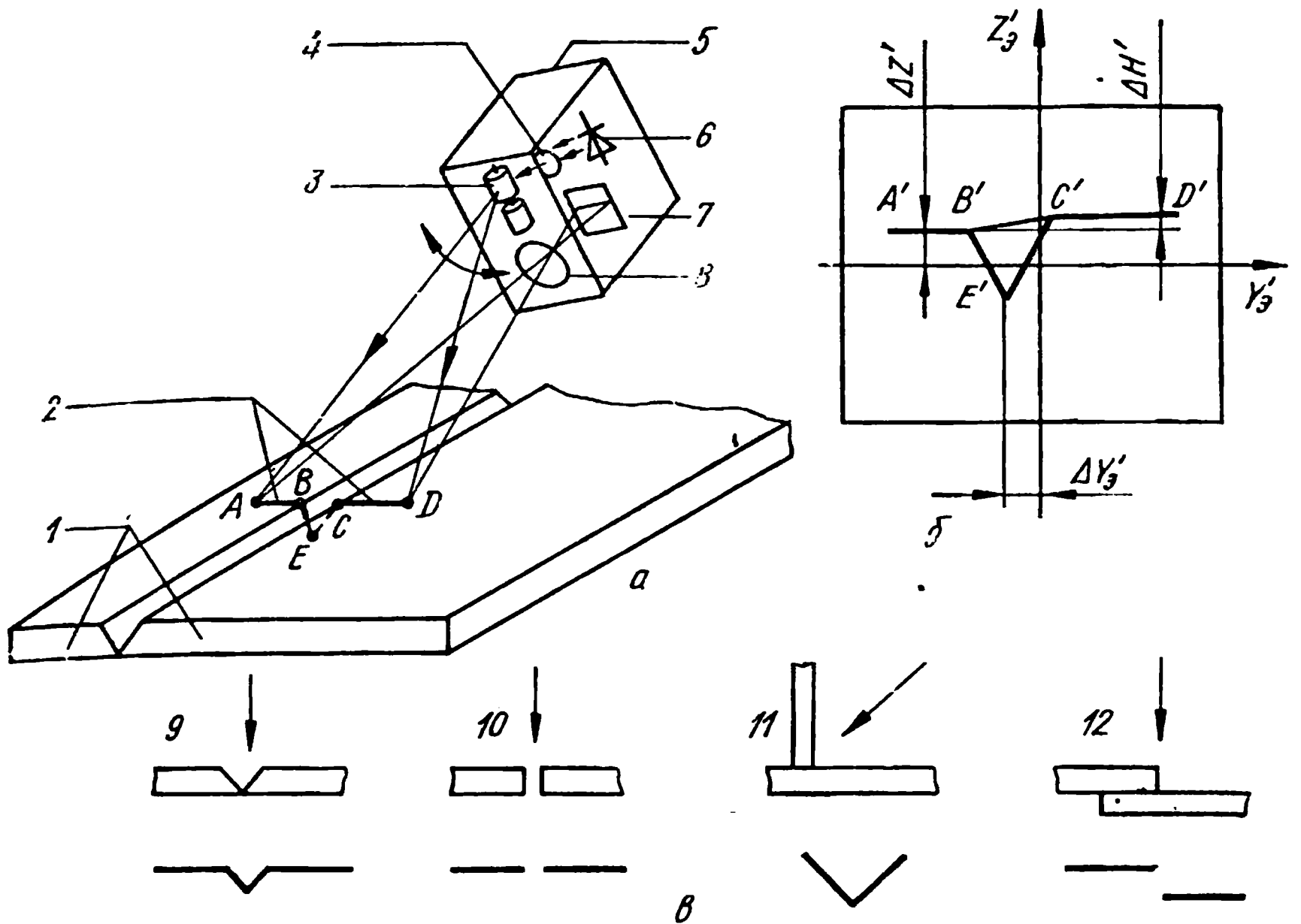


Рис. 2.39. Триангуляционный метод измерения положения линии соединения с помощью видеосенсора:

*a* — схема, поясняющая сущность метода; *б* — изображение на экране видеоконтрольного устройства; *в* — направление освещения и изображения при различных типах соединений; 1 — свариваемые элементы; 2 — освещенная линия (ABCDE) на поверхности свариваемых элементов; 3 — сканирующее зеркало; 4 — коллиматор; 5 — видеосенсор; 6 — светодиод; 7 — матричный фотоприемник; 8 — объектив; 9 — стыковое соединение с разделкой; 10 — стыковое соединение с зазором; 11 — тавровое соединение; 12 — нахлесточное соединение

поверхностями скоса кромок на заданной глубине; взаимное превышение поверхностей свариваемых элементов. Метод светового сечения можно использовать для получения информации и адаптивного управления параметрами процесса сварки. Световое сечение можно осуществить также световой плоскостью, представленной движущимся точечным лучом (рис. 2.39, *a*), либо стационарным щелевым лучом или стационарной светотеневой границей.

Картина, воспринимаемая матричным (или другим двумерным) фотоприемником, определяется типом соединения (рис. 2.39, *б, в*). След линии соединения отчетливо виден и, следовательно, его координаты относительно сенсора могут быть определены. Фактические смещения линии соединения по координатам  $Y_3$  и  $Z_3$  связаны с видимыми на видеоконтрольном устройстве (координаты  $Y'_3$  и  $Z'_3$ ) следующими соотношениями:

$$\Delta Y'_3 = \Delta Y k_{o.в}; \quad \Delta Z'_3 = \Delta Z k_{o.в} k_{тр},$$

где  $k_{o.в}$  — коэффициент оптических преобразований и преобразований видеосигнала в изображение;  $k_{тр}$  — коэффициент триангуляции.

В системах с применением триангуляционного метода могут быть также определены зазор в соединении (превышение кромок  $\Delta H = \Delta H' / (k_{o.в} k_{тр})$ ) и сечение разделки (площадь треугольника  $B'C'E'$  с учетом



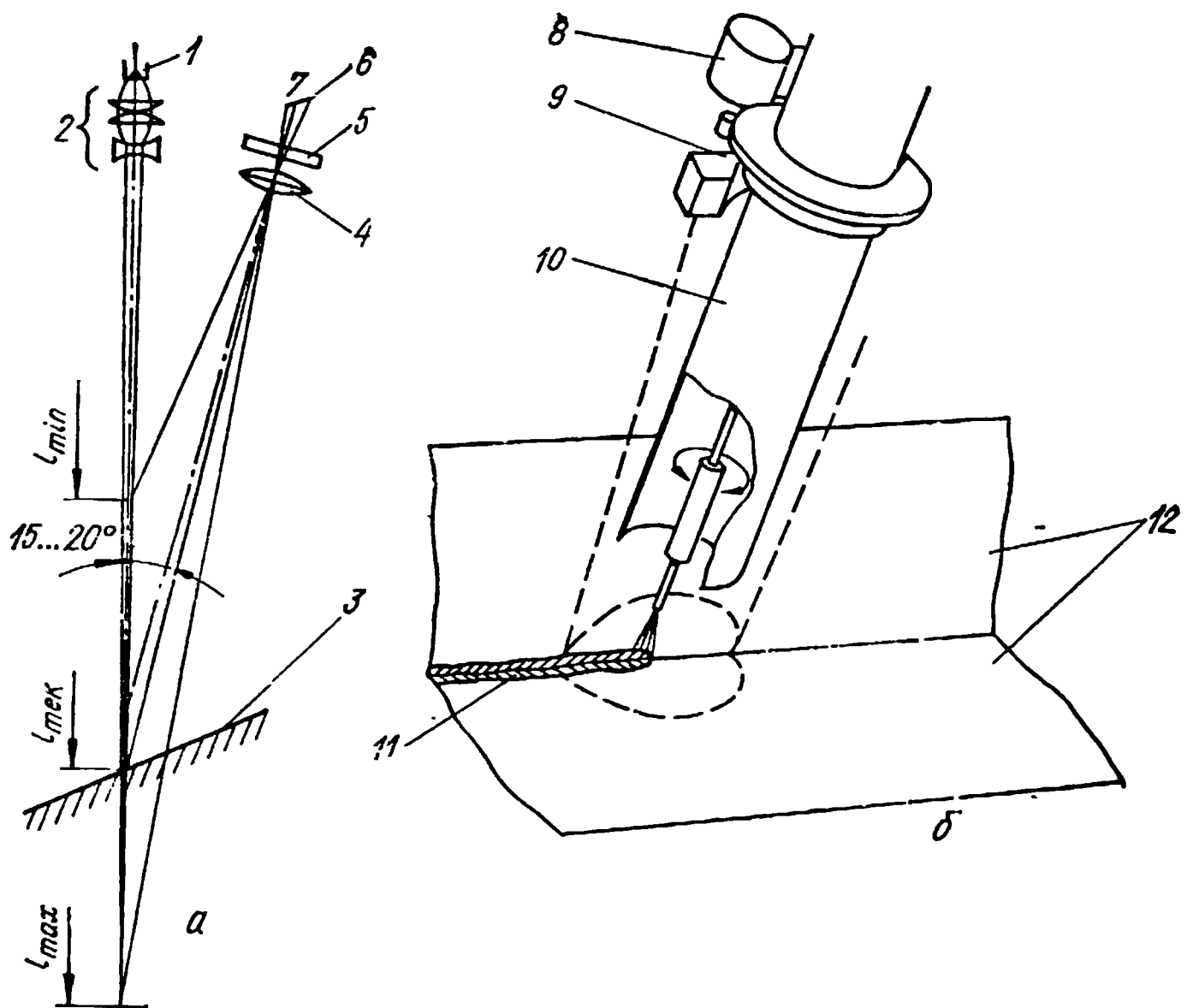


Рис. 2.40. Видеосенсор с круговым сканированием вокруг точки сварки:

*a* — схема использования триангуляционного метода в сенсоре с фотоприемником в виде линейки фотодиодов; *b* — схема вращения сенсора вокруг точки сварки; 1 — лазерный диод; 2 — фокусирующая система; 3 — поверхность изделия; 4 — объектив; 5 — интерференционный фильтр; 6 — фотоприемник (линейка фотодиодов ПЗС); 7 — изображение освещенной точки изделия на фотоприемнике; 8 — двигатель кругового сканирования; 9 — видеосенсор; 10 — горелка; 11 — сварной шов; 12 — поверхности свариваемых элементов

коэффициентов  $k_{o.v}$  и  $k_{тр}$ ) или заплываемой части соединения (для угловых соединений снаружи).

Для того чтобы производить измерения в зонах, расположенных перед точкой сварки и после нее, можно осуществлять круговое сканирование лазерного луча вокруг точки сварки. При этом за один цикл сканирования производится измерение одного цилиндрического или конического светового сечения соединения, подготовленного под сварку, и одного сечения полученного сварного соединения.

Система\*, реализующая такой метод измерения, основана на использовании лазерного дальномера с применением принципа триангуляции (рис. 2.40). В качестве излучателя используется полупроводниковый лазер из арсенида галлия с мощностью от 1 до 10 Вт в импульсе, работающий на волне длиной 904 нм (ближний инфракрасный свет). Излучение лазера формируется оптической системой в тонкий луч с диаметром 2 мм у выхода оптической системы и 0,3 мм на расстоянии 180 мм. На поверхности изделия проектируется яркое пятно соответствующего диаметра. Положение указанного пятна наблюдается под углом 15—20° к оси этого луча второй оптической системой, которая

\* Разработана специалистами Института технической кибернетики и робототехники Академии наук Народной Республики Болгарии в рамках совместной советско-болгарской разработки комплекса технических средств робототехники для сварочного производства (совместно с Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР).

фокусирует изображение пятна на полупроводниковой линейке фотодиодов с зарядной связью (ПЗС). Расстояние между центрами элементов такой линейки может составлять 10—15 мкм, а чувствительность — достаточна для получения различного импульса в широком диапазоне изменения коэффициента отражения поверхности изделия. Для уменьшения влияния света дуги перед приемником ПЗС ставится интерференционный фильтр. Описанная оптическая система обеспечивает разрешающую способность примерно 0,3—0,5 мм в зависимости от расстояния и случайных помех в диапазоне 100—200 мм от выходного отверстия оптической системы лазерного излучателя.

Далее информация подвергается предварительной фильтрации, определяется расстояние и в результате многократных измерений (примерно 200 в течение одного поворота датчика вокруг горелки, из которых около 80 % достоверных) формируется полная трехмерная модель свариваемого соединения в зоне вокруг сварки. Из этой модели можно определить: угол разделки или угол между свариваемыми элементами; величину превышения кромок; форму наплавленного валика; расстояние между горелкой и поверхностью изделия; угол между осью горелки и линией соединения.

Для полного использования информации, получаемой при помощи сенсора такого типа, система управления должна включать в себя один 16-разрядный микропроцессор или два 8-разрядных. Кроме того, система управления должна содержать математическую модель процесса сварки, которую можно использовать для управления режимом сварки в зависимости от геометрических параметров разделки и получаемого сварного соединения.

**Следящие системы с электроразрядными датчиками.** Они основаны на использовании электрической цепи, образуемой щупом-электродом, изделием и электрическим разрядом (например, дугой) между ними. В качестве щупа-электрода можно использовать специальный электрод, расположенный впереди точки сварки, или сварочный электрод. Последний вариант — наиболее перспективный.

Использование сварочной дуги в качестве датчика положения свариваемого соединения основано на измерении параметров дугового процесса, зависящих от расстояния между концом электрода и поверхностью изделия. При сварке плавящимся электродом в качестве основного информационного параметра используется сварочный ток. При сварке неплавящимся электродом с применением источника питания с крутопадающей характеристикой более информативным параметром является напряжение на дуге. При сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка могут оказаться эффективными методы измерения, использующие в качестве информативного параметра частоту коротких замыканий или их скважность.

Тип следящей системы с использованием сварочной дуги в качестве датчика в значительной степени определяется технологией и техникой сварки и конструкцией сварочной аппаратуры. Так непрерывное измерение без сканирования можно применить, если по технологии допустима сварка двумя проволоками (расщепленным электродом), расположенными поперек линии соединения. При этом в

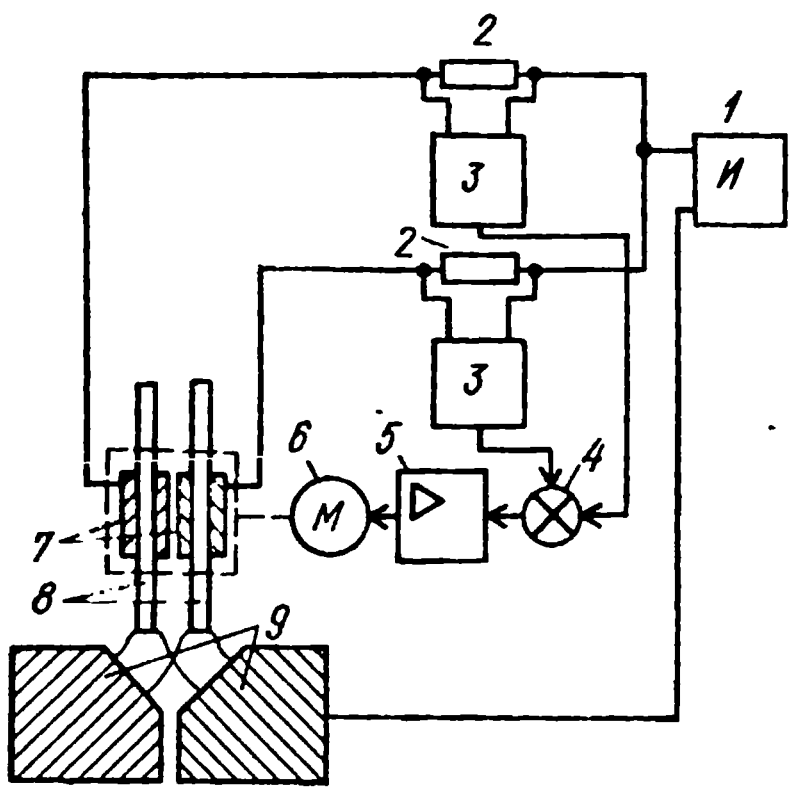


Рис. 2.41. Функциональная схема системы наведения электродов на линию свариваемого соединения при двухэлектродной сварке (расщепленным электродом):

1 — источник питания дуги; 2 — измерительные шунты; 3 — измерительные преобразователи; 4 — сравнивающее устройство; 5 — усилитель; 6 — исполнительный двигатель; 7 — токоподводящие элементы сварочной горелки; 8 — электродные проволоки; 9 — свариваемые заготовки

качестве сигнала положения пары электродов относительно свариваемого соединения используется разность двух токов, протекающих через электродные проволоки (рис. 2.41). Эти системы можно применить при сварке стыковых швов с разделкой кромок и различных угловых швов. Основную сложность представляет реализация двух изолированных между собой токоподводов к электродным проволокам и обеспечение изоляции между ними. Кроме того, токоподвод к проволоке должен быть фиксирован, а конструкция подающего механизма обеспечивать одинаковые скорости подачи проволок. При этом разность поперечных сечений проволок в каждый момент времени должна быть предельно малой.

Значительно более широкие возможности представляет измерение со сканированием дугой поперек линии соединения. Сканирование осуществляется движением сварочной горелки (возвратно-поступательным или колебательным) либо воздействием на дугу управляемым магнитным полем.

Измеряя параметры дугового процесса во времени и сопоставляя результаты измерения с фазой сканирования, можно получить информацию о положении характерных элементов свариваемого соединения (зазора, стенок разделки, верхней кромки и т. д.). В связи со значительной случайной составляющей в параметрах дугового процесса эффективным будет сравнение интегральных значений параметров на смежных полупериодах сканирования.

В электромеханических сканирующих устройствах режим сканирования должен быть согласован с требуемой технологией и техникой сварки, исходя из условий формирования сварного шва с заданными параметрами. В этом случае параметры развертки (амплитуда, частота, форма траектории) определяются требованиями технологии и для разработчика системы слежения являются заданными. При сканировании путем отклонения дуги электромагнитным полем параметры развертки могут выбираться в более широких пределах, так как частота отклонения дуги может быть значительно больше, а время нахождения дуги в отклоненном положении — меньше, чем при электромеханическом сканировании (см. прил. 13).

Таким образом, системы с использованием сварочной дуги как электроразрядного датчика перспективны благодаря их следующим основным преимуществам: а) измерение осуществляется непосредственно в точке сварки, что исключает запоминание полученной информации при любых формах линии соединения; б) в зоне сварки отсутст-

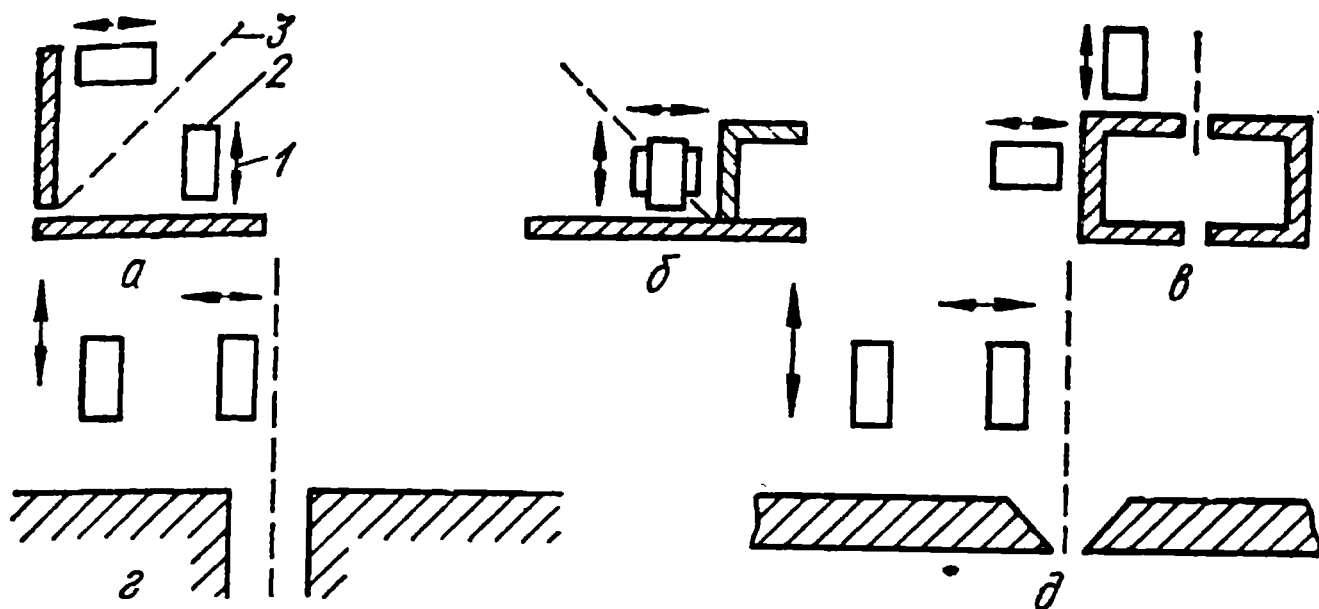


Рис. 2.42. Типы и конструктивные разновидности соединений:

*a* — угловое (изнутри); *б* — тавровое, с одной узкой полкой; *в* — стыковое (при точных размерах свариваемых элементов); *г* — стыковое, в узкий глубокий зазор; *д* — стыковое, с разделкой кромок;

*1* — направление перемещения; *2* — датчик; *3* — ось сварочного электрода

вуют какие-либо измерительные устройства; в) управление непосредственным положением дуги исключает влияние следующих факторов: износ токоподвода, отклонения свободного конца электродной проволоки и т. д., которые не могут быть учтены в большинстве других видах систем.

**Следящие системы с электромагнитными датчиками.** Они наиболее распространенные. Электромагнитные датчики могут быть использованы для определения положения: стыка без разделки кромок, кромки верхнего листа нахлесточного соединения, скосов кромок; для измерения расстояния до поверхности свариваемых элементов, ширины зазора, величины превышения кромок, а также для определения положения начала и конца свариваемого изделия или прихваток. Выбирая различные положения датчиков относительно поверхностей свариваемых элементов, можно использовать эти датчики при сварке различных соединений и их разновидностей (рис. 2.42).

Простейший электромагнитный датчик состоит из Ш-образной магнитной системы и трех обмоток (рис. 2.43, *a*). Обмотка 3, расположенная на среднем стержне, питается от источника тока повышенной частоты. Переменное магнитное поле, создаваемое обмоткой, наводит в свариваемом изделии вихревые токи. Непроводящий зазор между деталями разделяет вихревые токи на два контура, показанных на рис. 2.43, *б*. Результирующее магнитное поле датчика создается не только током, протекающим в обмотке 3, но и вихревыми токами.

При симметричном относительно датчика расположении зазора контуры вихревых токов равны, симметричны и  $I_1 = I_2$ . Соответственно

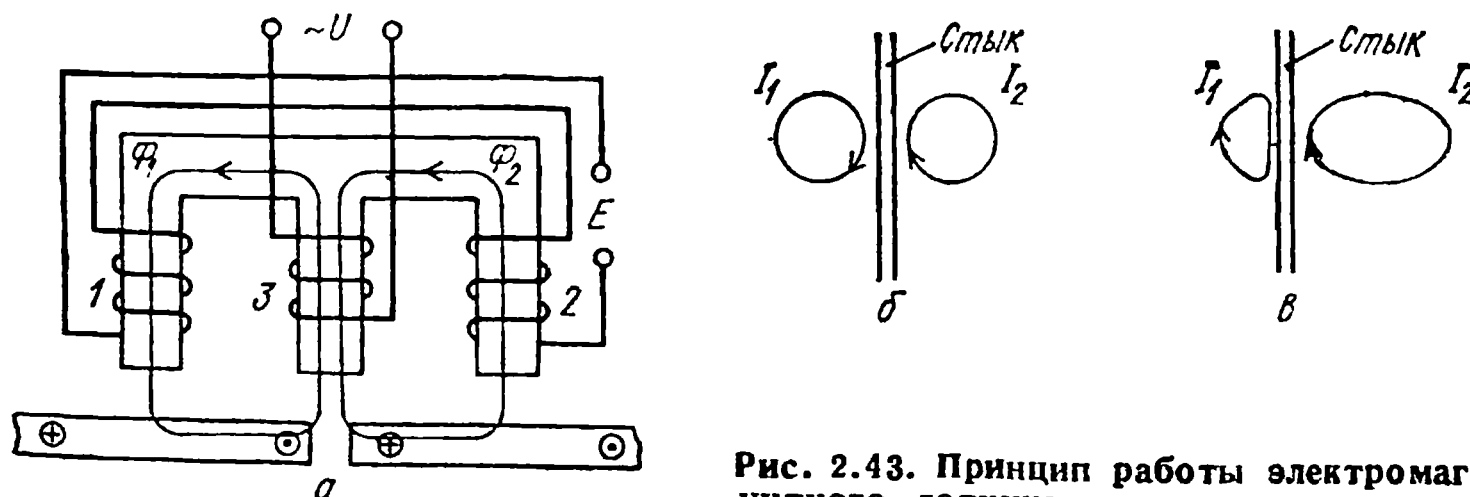


Рис. 2.43. Принцип работы электромагнитного датчика

равны магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и наводимые ими э. д. с. в измерительных обмотках 1 и 2. При встречном включении э. д. с. обмоток 1 и 2 компенсируются, и сигнал на выходе датчика равен нулю.

При несимметричном расположении датчика относительно стыка (рис. 2.43, в) контуры вихревых токов оказываются различными, токи  $I_1 \neq I_2$ . Это приводит к нарушению равенства магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и возникновению на выходе датчика э. д. с.  $E$ , сигнализирующей об отклонении средней плоскости датчика от плоскости стыка. Направление отклонения датчика от стыка видно по сдвигу фазы э. д. с. относительно тока, протекающего в обмотке 3. При изменении направления отклонения на противоположное фазовый сдвиг э. д. с. изменяется на  $180^\circ$ .

Электромагнитные датчики наиболее широко применяют для определения положения стыка при сварке стыковых соединений без разделки кромок.

На выходной сигнал датчика влияют: координаты стыка; отклонения геометрических параметров соединения, подготовленного под сварку; свойства материала изделия; различия электрических и магнитных свойств материала заготовок, вызванные изменениями химического состава и условиями предварительной механической обработки; характеристики окружающей среды и процесса. При сварке стыковых швов значительное влияние на выходной сигнал датчика оказывает взаимное превышение кромок.

Чтобы уменьшить погрешность датчика, возникающую при превышении кромок, используют различные схемные и конструктивные способы компенсации [16]. Один из них основан на различии фазы сигнала, получаемого от датчика, если он смещен относительно стыка при отсутствии или при наличии превышения кромок. Для компенсации превышений фаза опорного сигнала, подаваемого на фазовый детектор, подбирается так, чтобы она отличалась на  $90^\circ$  от составляющей фазы выходного сигнала датчика, вызванной превышением кромок. При этом выходной сигнал датчика практически не зависит от величины превышения кромок.

Кроме того, чтобы компенсировать превышение кромок, магнитопровод датчика можно выполнить из трех частей (рис. 2.44): центральной Ш-образной и двух боковых П-образных, отделенных от центральной немагнитными прокладками. На среднем стержне расположена обмотка возбуждения 1. На промежуточных частях Ш-образного магнитопровода расположены измерительные, дифференциально включенные обмотки 2, а на крайних магнитопроводах размещены дополнительные (компенсирующие) обмотки 3, соединенные встречно-последовательно со смежными измерительными обмотками. Сигнал на выходе дополнительных обмоток зависит только от изменения превышения кромок и компенсирует составляющую сигнала измерительных обмоток, зависящую от превышения кромок. В результате выходной сигнал датчика определяется его положением относительно стыка и не зависит от превышения кромок.

В последние годы появляются системы со сканирующими электромагнитными датчиками, которые в сочетании с обработкой сигнала датчика средствами вычислительной техники позволяют расширить



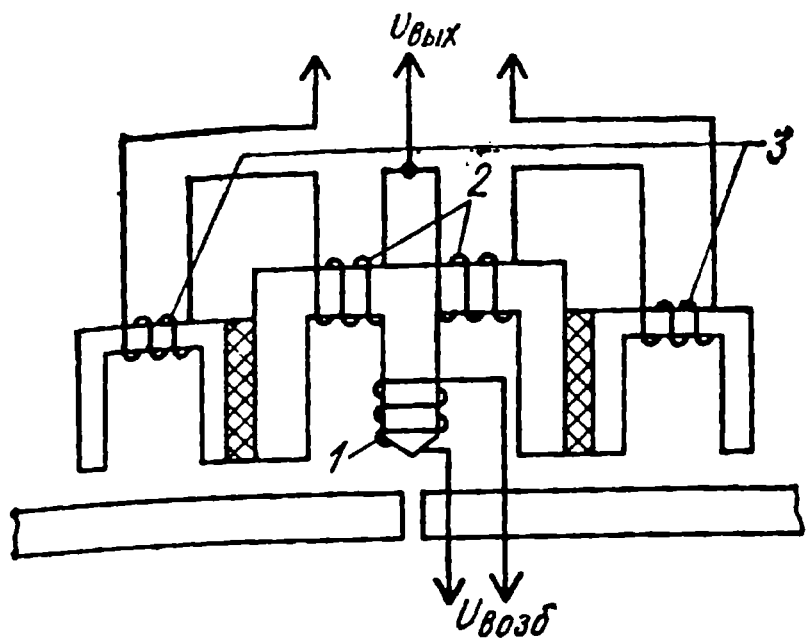


Рис. 2.44. Схема электромагнитного датчика с компенсирующими обмотками

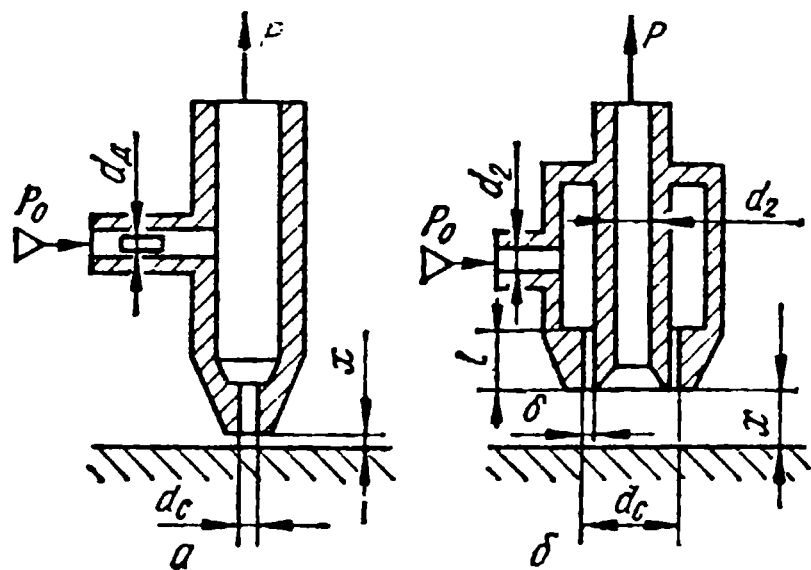


Рис. 2.45. Схемы пневматических датчиков: а — дроссельного (типа сопло — заслонка); б — струйного

возможности электромагнитного метода измерения, чтобы управлять положением электрода относительно свариваемого соединения.

Для рассмотренных электромагнитных датчиков частота напряжения питания обмотки возбуждения может быть от одного до нескольких десятков килогерц, что позволяет свести к минимуму влияние на выходной сигнал датчика электромагнитных полей промышленной частоты.

Следящие системы с фотопирометрическими, пневматическими и другими датчиками. Системы с фотопирометрическими датчиками применяют главным образом при сварке спиральношовных труб, когда нагрев зоны соединения, полученный при сварке первой головкой, используется затем для измерения положения стыка датчиками последующих сварочных головок.

Используют также следящие системы с пневматическими датчиками, измеряющими расстояние до поверхности изделия. Известны два типа таких датчиков:

1. Датчик типа сопло — заслонка, т. е. дроссельного типа (рис. 2.45, а), который работает при избыточном давлении питания  $P_0 = 0,14$  МПа и обеспечивает выходной сигнал  $P = 0,02 \div 0,1$  МПа. Диаметр отверстия сопла  $d_c = 0,5 \div 0,1$  мм, диаметр дросселя  $d_d = 0,25$  мм. Наибольшее расстояние, контролируемое датчиком, измеряется десятками долями миллиметра, что затрудняет его использование при грубых поверхностях, характерных для многих свариваемых изделий.

2. Датчик, основанный на использовании давления отраженной струи (рис. 2.45, б). Он работает при избыточном давлении питания  $P_0 = 0,1 \div 0,2$  МПа. С помощью этого датчика можно контролировать положение поверхности изделия на расстоянии до 6 мм.

Известны и другие способы измерения положения соединения относительно сварочной горелки, в частности с помощью ионизационных, акустических, ультразвуковых и других датчиков.

Из анализа особенностей различных следящих систем следует, что способ измерения положения стыка свариваемого соединения, датчик и его конструкцию можно выбрать, учитывая следующие основные факторы: тип сварного соединения; габариты свободного про-



странства в зоне, прилегающей к соединению; материал изделия; характер его поверхности и кромок, подготовленных под сварку; особенности технологического процесса изготовления изделия. Многие из рассмотренных способов измерения положения соединения относительно электрода используют в системах адаптации роботов для дуговой сварки.

**Основные требования к сварочному оборудованию, оснащеному следящими системами.**

А. Между сварочным инструментом (горелкой, мундштуком) и датчиком должно быть минимальное количество промежуточных элементов, а взаимное положение электрода и датчика не должно изменяться под действием усилий подачи проволоки (например, если подаваемая проволока упирается в поверхность изделия при возбуждении дуги), вибраций, случайных механических воздействий. Наилучшим в этом смысле решением будет крепление датчика к нижней части сварочного инструмента.

Б. Возможность настройки (подстройки) взаимного положения сварочного инструмента и нейтрального положения датчика (измерительного устройства) при наладке и во время сварки.

В. Переход на ручное управление корректировочными перемещениями в случае внезапного выхода из строя следящей системы для того, чтобы окончить сварку изделия. Для этого установка, станок, сварочный автомат должны обеспечивать возможность наблюдения за совмещением сварочного инструмента со свариваемым соединением и быть оснащены соответствующей аппаратурой управления и индикации.

Г. Масса подвижных частей, перемещаемых приводами следящей системы, должна быть минимальна. В этой связи наилучшим решением при использовании следящих систем является выполнение корректировочных перемещений только сварочным инструментом.

Д. Манипуляционная система и базовые (неподвижные) элементы сварочного оборудования, а также их соединения должны иметь повышенную жесткость.

Е. Кинематические цепи и направляющие механизмов корректировочных перемещений должны состоять из минимального количества элементов, не иметь люфтов и обеспечивать наименьшую разницу между сопротивлением перемещению в движении и при трогании с места.

## **2.8. Адаптивные системы управления дуговой сваркой**

Системы управления, рассмотренные в § 2.3—2.7, имеют общие признаки. Во-первых, процесс формирования сварного соединения как объект с распределенными параметрами и внутренними связями (см. рис. 2.1) расчленялся на ряд одномерных объектов, для которых предполагалась заранее известная зависимость регулируемой величины от управляющего воздействия. Во-вторых, алгоритм управления принимался постоянным в процессе функционирования системы, что исключало ее самонастройку в случае изменения условий формирования сварного соединения, собственных параметров регулятора, влия-

ния неучтенных возмущений и т. д. Эти упрощения и ограничения вполне допустимы при решении сравнительно простых задач автоматизации дуговой сварки: стабилизация отдельных параметров режима, программное или следящее управление и т. д. Однако современный уровень развития техники и технологии дуговой сварки требует создания систем *адаптивного управления*, функционирование которых связано с изменением закона управления на основе информации о поведении объекта управления.

Актуальность проблемы создания адаптивных систем определяется трудностью обеспечения высокой точности подготовки и сборки изделий под сварку, при которой достигается постоянство формы, площади разделки и зазора между свариваемыми деталями. Системы адаптивного управления качеством сварных соединений в условиях технологических возмущений, изменяющихся в допустимых пределах, особенно необходимо использовать в робототехнических комплексах, реализующих безлюдную технологию.

Для того чтобы создать систему адаптивного управления, необходимо иметь устройства для автоматического измерения основных размеров разделки кромок, зазора между свариваемыми деталями, превышения кромок, положения шва в пространстве. Кроме того, необходима математическая модель, позволяющая по получению информации вычислять поправки к заранее установленному режиму сварки и траектории движения электрода относительно изделия. Эти поправки должны определяться в реальном масштабе времени с учетом динамики объекта управления и должны быть введены в задающие устройства соответствующих регуляторов. Такая система не имеет обратной связи по конечным результатам — размерам и форме сварного шва. В этом ее недостаток. Математическая модель должна достаточно точно учитывать влияние всех основных факторов, определяющих образование сварного соединения.

Можно создать систему с обратной связью, позволяющей автоматически корректировать математическую модель непосредственно в процессе сварки. Однако процесс самообучения требует времени. Поэтому не исключено появление дефектных участков сварных швов.

Адаптивные системы могут быть построены и на других принципах. Обширную информацию об образовании шва дает тепловое поле, возникающее в изделии во время сварки. Эту информацию можно, например, получить с помощью телевизионного изображения в инфракрасной части спектра (теповизора). Для управления целесообразно использовать зависимость теплового поля от разного рода возмущений, введенную в математическую модель.

Один из важнейших этапов проектирования адаптивных систем — разработка адекватных математических моделей объектов регулирования, которая развивается в настоящее время по следующим направлениям:

1. Применение классических методов описания процессов теплопроводности, гидродинамики, деформаций и т. п. Например, традиционно используемый способ описания тепловых процессов в свариваемом изделии на основе уравнения теплопроводности с учетом выделения теплоты фазового перехода.

2. Разработка регрессионных моделей геометрии, химического состава, прочностных свойств сварного шва. Например, выражение для расчета глубины проплавления  $H_{пр}$  можно получить в виде

$$H_{пр} = a_1 I_d + a_2 U_d + a_3 V_{св} + a_4 \delta + a_5 d + a_6 \Delta + \dots,$$

где  $I_d$ ,  $U_d$  — соответственно ток и напряжение дуги;  $V_{св}$  — скорость сварки;  $\delta$  — толщина изделия;  $d$  — диаметр электрода;  $\Delta$  — зазор в стыке;  $a_1 \div a_6$  — коэффициенты модели, получаемые с помощью регрессионного анализа на основе экспериментальных данных.

3. Подход, разработанный в МВТУ им. Н. Э. Баумана, позволяющий аппроксимировать зависимость качественных показателей от параметров режима с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений.

Каждый подход имеет определенные преимущества и недостатки. Так, при первом подходе сохраняются наглядность и физическая сущность процесса, достаточно обоснованно вводятся критерии оптимизации качества соединения, однако математический аппарат остается сложным, а аппаратная реализация закона управления в реальном масштабе времени требует применения сложных вычислительных устройств. При втором подходе получаются простые алгоритмические выражения, позволяющие быстро и точно рассчитывать определенные параметры, соединения, но динамика процессов остается вне поля зрения, поэтому трудно применить эти модели при синтезе систем управления. Третий подход — это попытка сохранить положительные стороны регрессионных моделей и в то же время учесть развитие процессов во времени. Полученные в виде обыкновенных дифференциальных уравнений модели позволяют применять теорию управления системами с сосредоточенными параметрами к синтезу САР процессами дуговой сварки. Однако неизбежные при реализации подхода упрощающие допущения требуют в каждом случае изучения связи между регулируемой величиной и ее влиянием на качество соединения. На основании рассмотренных подходов можно построить математическую модель процесса с конечной точностью. Это связано с тем, что на стадии проектирования невозможно учесть все возмущения, действующие на процесс. Поэтому в подобных случаях определяют модель для наиболее типичных режимов функционирования объекта.

## 2.9. Управление переносом электродного металла

Плавление и перенос электродного металла при дуговой сварке оказывают влияние на металлургические процессы в сварочной ванне и динамические характеристики электрических параметров сварочной дуги, в значительной мере определяют технологические возможности процесса, его стабильность и устойчивость.

Перенос электродного металла характеризуют размерами капель и частотой их перехода в сварочную ванну. Повышение плотности сварочного тока в электроде сопровождается последовательным переходом от крупнокапельного с короткими замыканиями дугового промежутка к мелкокапельному и струйному переносам. Формирование и отрыв капли определяются соотношением двух сил, действующих

на каплю в противоположных направлениях. Сила поверхностного натяжения  $F_{п.н}$ , удерживающая на торце электрода каплю, обратно пропорциональна ее радиусу.

Электромагнитная сила, отрывающая каплю от электрода,

$$F_{ЭМ1} = \frac{\mu_0 I_D^2}{4\pi} \ln \frac{d_k}{d_э}. \quad (2.31)$$

Сила, отталкивающая каплю от столба дуги вверх,

$$F_{ЭМ2} = \frac{\mu_0 I_D^2}{4\pi} \ln \frac{d_k}{d_a}, \quad (2.32)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $I_D$  — ток дуги;  $d_k$ ,  $d_э$ ,  $d_a$  — соответственно диаметры капли, электрода, анодного пятна на капле.

Результирующая электромагнитная сила

$$F_{ЭМ} = \frac{\mu_0 I_D^2}{4\pi} \ln \frac{d_a}{d_э}. \quad (2.33)$$

Капля может оторваться при выполнении условия:

$$F_{ЭМ} > 0; F_{ЭМ} > F_{п.н}. \quad (2.34)$$

Из (2.33) и (2.34) следует, что капля отрывается лишь при определенном соотношении  $d_э$  и  $d_a$ . Наиболее просто осуществляется управляемый перенос при дуговой сварке в аргоне, поскольку в этом случае  $d_a > d_э$ .

При сварке в углекислом газе управляемый перенос с принудительным отрывом капель получить не удастся, так как дуга сжата и  $d_a < d_э$ .

Переносом электродного металла можно управлять, воздействуя на величину сил  $F_{п.н}$  и  $F_{ЭМ}$ . На поверхностное натяжение расплавленного металла оказывает влияние состав газовой среды, например, малые добавки кислорода в защитную среду при сварке в аргоне способствуют уменьшению размеров капель и переходу к струйному переносу на более низких токах. Практическое применение получил способ управления переносом при наложении на сварочный ток кратковременных мощных импульсов, позволяющих изменить характер переноса электродного металла с крупнокапельного на мелкокапельный или струйный, повысить стабильность процесса (например, при сварке алюминиевых сплавов в среде аргона снизить нижний предел тока и обеспечить возможность выполнений швов во всех пространственных положениях).

При импульсно-дуговой сварке значительно уменьшаются потери легирующих элементов в расплавленном металле. Процесс импульсно-дуговой сварки осуществляется без введения обратных связей по параметрам плавления электрода, поэтому он относится к разомкнутым системам управления. Однако опыт эксплуатации показывает, что за счет рационального выбора амплитуды и длительности управляющих импульсов, особенно в сочетании с рациональным выбором газовой защитной среды, можно достичь хороших результатов, обеспечив

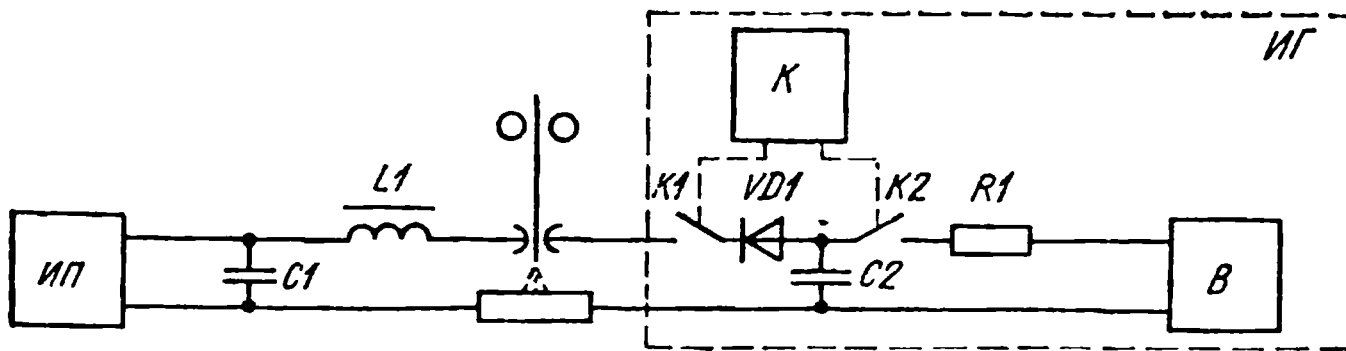


Рис. 2.46. Устройство для импульсно-дуговой сварки

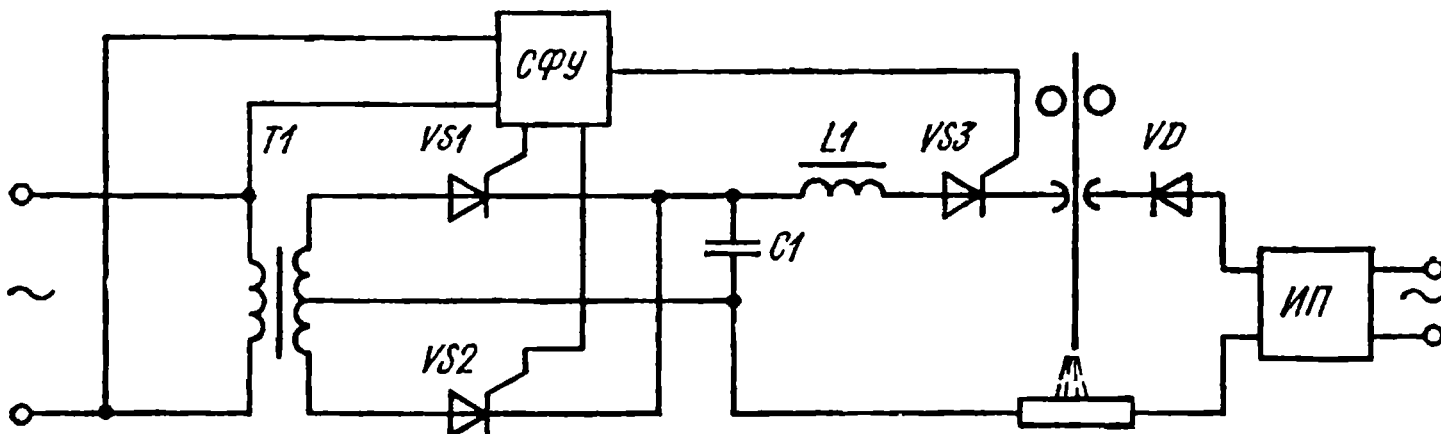


Рис. 2.47. Схема устройства для импульсно-дуговой сварки с накопительной емкостью

устойчивый процесс плавления электродной проволоки и небольшие потери на угар и разбрызгивание.

Для генерирования импульсов тока используют специальные импульсные генераторы ИГ, которые подключали параллельно основному источнику питания ИП (рис. 2.46), обеспечивающему постоянный базовый сварочный ток. Импульс тока возникает при разряде конденсатора  $C2$  через дуговой промежуток и замкнутый ключ  $K1$ . Конденсатор заряжается в интервале между импульсами тока от выпрямителя  $B$  через сопротивление  $R1$  и ключ  $K2$  (ключ  $K1$  разомкнут). Управление ключами осуществляется коммутатором  $K$ . Схема коммутации, состоящая из ключей  $K1$ ,  $K2$  и коммутатора  $K$ , выполняется на тиристорах.

В системах управления процессами переноса электродного металла чаще всего используются схемы с фазовым управлением СФУ (рис. 2.47). Тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  образуют выпрямитель, управляемый СФУ. После заряда накопительной емкости  $C1$  тиристор  $VS3$  открывается и ток разряда конденсатора накладывается на дугу, форма импульсов задается параметрами конденсатора  $C1$  и дросселя  $L1$ . Вентиль  $VD$  предохраняет источник питания от пробоя высоким напряжением.

В качестве емкости  $C1$  применяют батарею из нескольких параллельно включенных конденсаторов, что позволяет регулировать длительность импульсов тока.

Помимо схем, использующих накопительную емкость, применяются схемы получения импульсов непосредственно от сети (рис. 2.48). Основной элемент схемы —

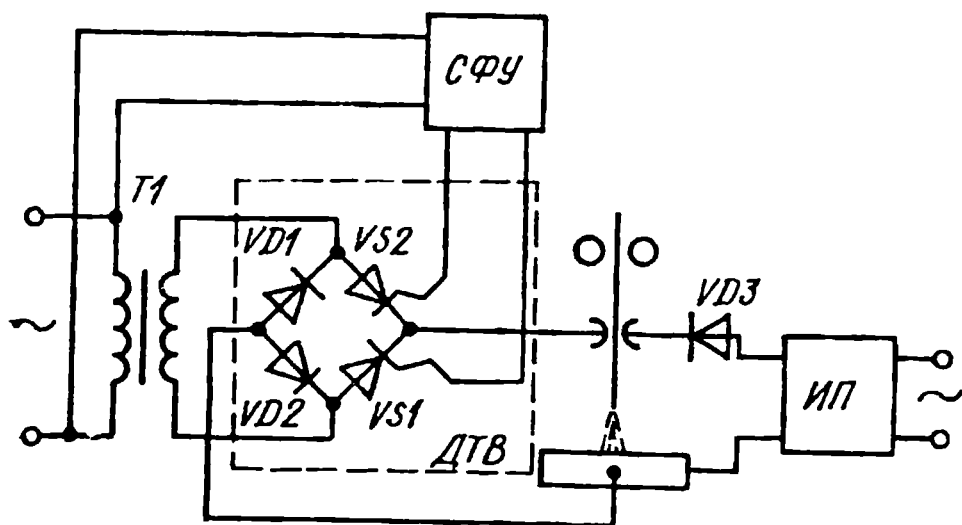


Рис. 2.48. Схема устройства для импульсно-дуговой сварки без накопительной емкости

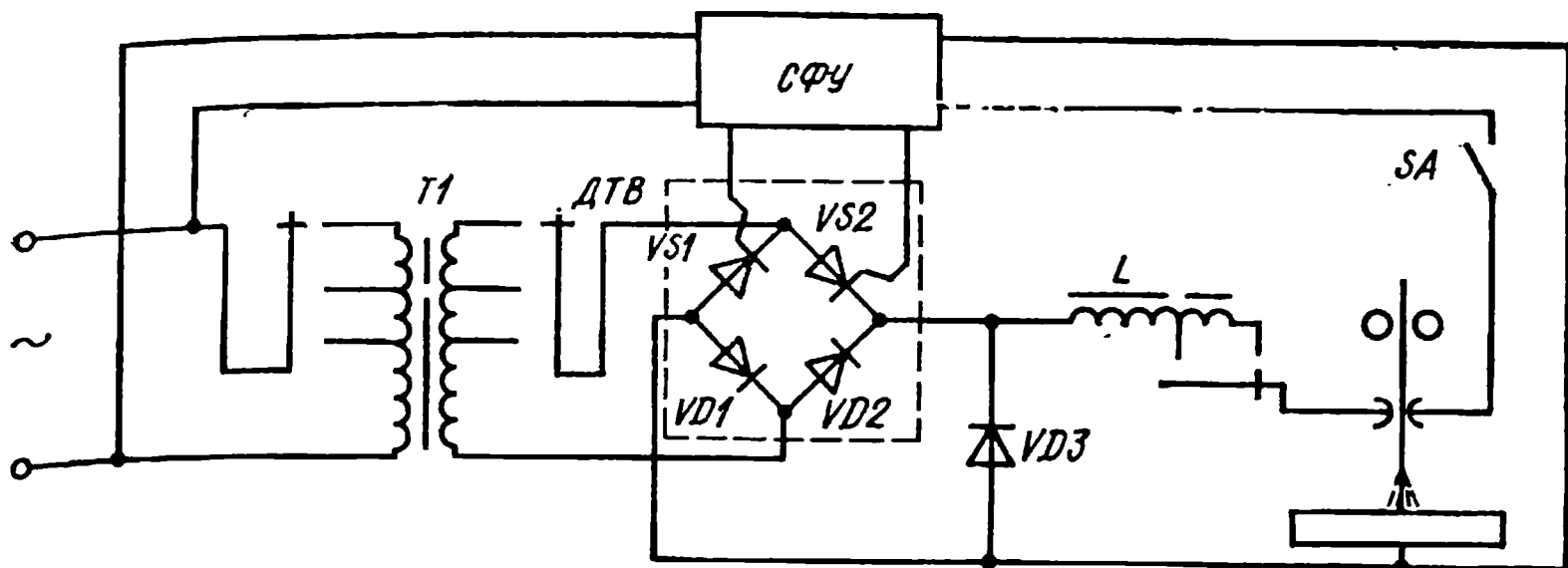


Рис. 2.49. Схема импульсного источника питания с регулируемой индуктивностью

диодно-тиристорный выпрямитель *ДТВ*, управляемый *СФУ*. По сигналам управления *СФУ* импульсы со вторичной обмотки трансформатора *T1* подаются непосредственно на дугу.

Перспективным направлением является создание импульсных источников, обеспечивающих питание дуги базовым импульсным током без дополнительного силового выпрямителя (рис. 2.49). Кроме диодно-тиристорного выпрямителя *ДТВ* схема содержит нелинейную регулируемую индуктивность *L*. При прохождении импульса тока от вторичной обмотки трансформатора *T1* через *ДТВ* и индуктивность *L* сердечник накапливает определенное количество электромагнитной энергии. В промежутке между импульсами энергия магнитного поля в сердечнике преобразуется в электрическую энергию и через дугу протекает базовый ток.

Количество энергии, запасаемой сердечником *L*, а следовательно и величина базового тока регулируются числом витков обмотки и величиной воздушного зазора в магнитопроводе. Амплитуда импульсов сварочного тока задается углом открывания тиристоров *VS1*, *VS2* и числом витков вторичной обмотки *T1*. Длительность импульсов плавно регулируется *СФУ*. Изменением нелинейной индуктивности обеспечивается регулирование фронтов нарастания и спада импульсов тока. Это позволяет управлять процессами плавления и переноса электродного металла, чтобы уменьшить выгорание легирующих элементов и улучшить качество сварных соединений, особенно при сварке малых толщин.

В схему источника можно ввести обратную связь по напряжению дуги (через ключ *SA*), а также предусмотреть возможность сварки модулированным низкочастотным импульсным током.

В качестве независимого импульсного источника питания можно использовать выпрямитель типа ВДГИ-301 (рис. 2.50). Через дугу протекает базовый ток от вторичных обмоток трансформатора *T1* через *VD1*, *VD2* и дроссель *L*. (Схема фазового управления тиристорами *VS5*, *VS6* условно не показана). Импульсы частотой 50 (100) Гц

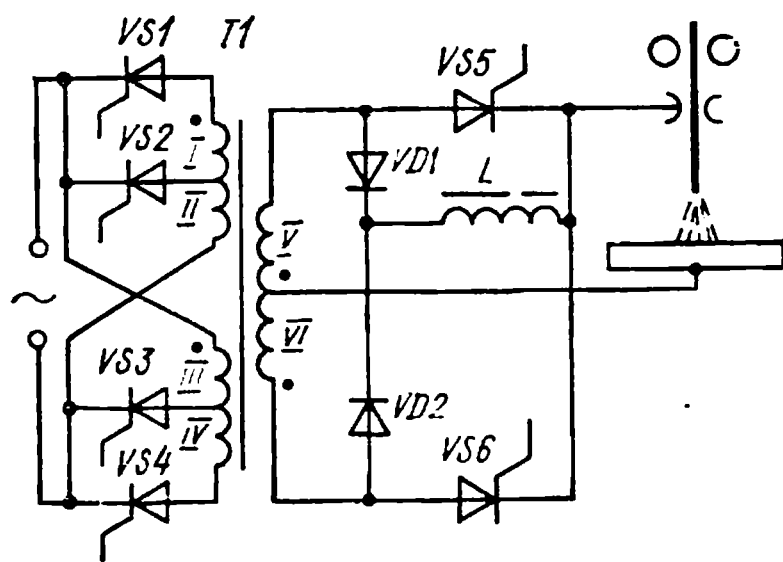


Рис. 2.50. Схема независимого импульсного источника питания типа ВДГИ-301



формируются при периодическом шунтировании дросселя тиристорами  $VS5$  ( $VS6$ ) при включенных тиристорах  $VS1$ ,  $VS4$ . Для переключения источника на более крутые импульсы (с большими амплитудами) одновременно с тиристором  $VS5$  ( $VS6$ ) включается тиристор  $VS2$  ( $VS3$ ).

Базовое напряжение, ток, амплитуда и длительность импульсов тока регулируются системой фазового управления тиристорами  $VS1—VS4$  и  $VS5$ ,  $VS6$ .

## 2.10. Системы магнитного управления формированием и кристаллизацией сварных швов

Одно из направлений совершенствования процессов сварки плавления — применение внешних магнитных полей для преимущественного воздействия на источник нагрева (дугу) или гидродинамику сварочной ванны, например, при электромагнитном перемещении ее расплава (ЭМП). В обоих случаях создаются принципиально новые возможности для управления формированием и кристаллизацией сварных швов и определяемыми ими показателями качества сварных соединений [5, 38]. Системы с использованием электромагнитных воздействий (ЭМВ) в качестве управляющих обладают наименьшей инерционностью, так как в отличие от САУ с воздействием на скорость подачи электрода, величину его вылета (см. § 2.5) не требуют применения электромеханических исполнительных устройств.

Колебания дуги поперек или вдоль шва внешним поперечным относительно столба дуги реверсируемым магнитным полем (рис. 2.51) применяются для улучшения прогрева свариваемых кромок, регулирования глубины проплавления, обеспечения хорошего формирования швов при повышенных скоростях сварки и перекрытия валиков при наплавке.

Особенность сварки с ЭМП — создание управляющих воздействий непосредственно в сварочной ванне, т. е. той части объекта управления (см. рис. 1.1 и рис. 2.1), в которой происходят процесс образования

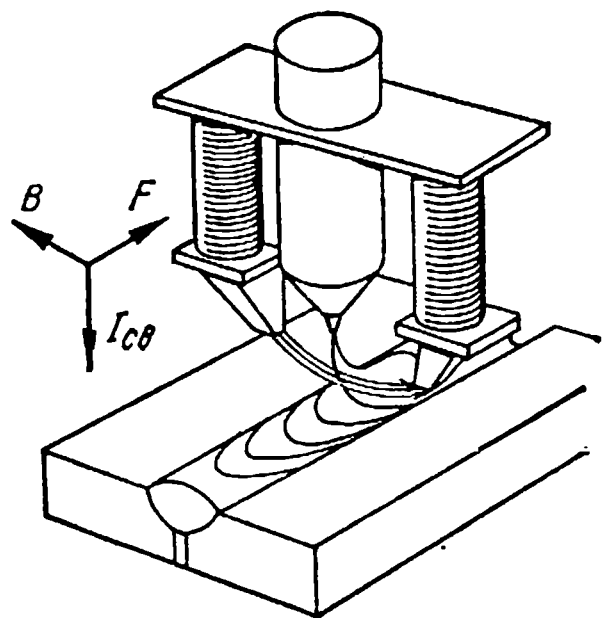
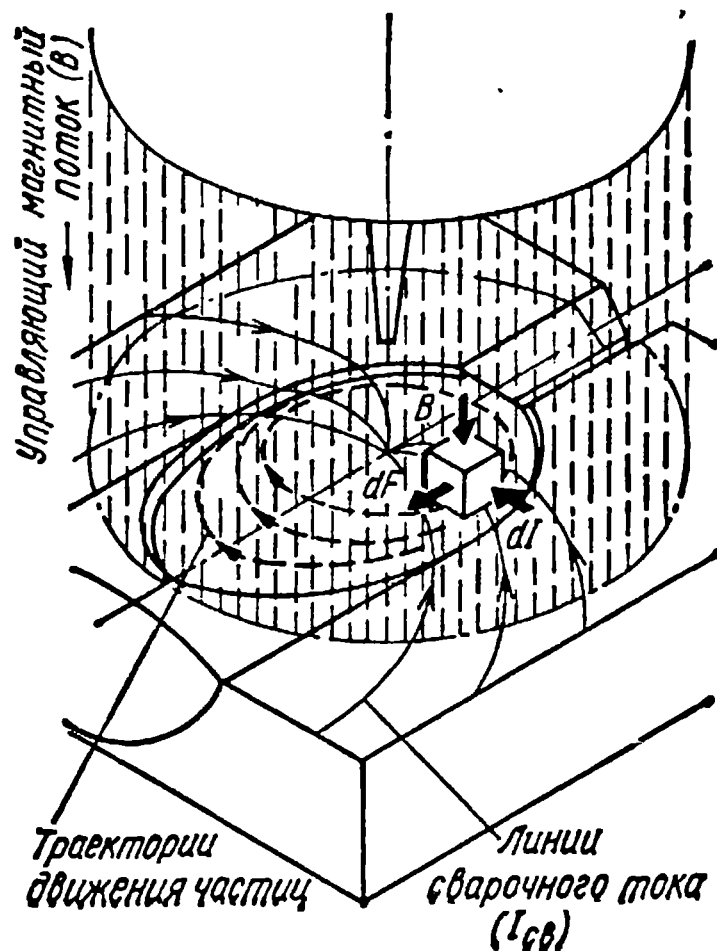


Рис. 2.51. Отклонение дуги вдоль шва поперечным магнитным полем ( $B$ )

Рис. 2.52. Схема взаимодействия внешнего аксиального магнитного поля ( $B$ ) со сварочным током ( $I_{св}$ ) при ЭМП (штриховой линией указаны траектории движения частиц расплава под действием электромагнитных сил  $F$ )



сварного соединения. Для осуществления ЭМП используют аксиальное (продольное относительно электрода) магнитное поле (рис. 2.52). Взаимодействие его с радиальной составляющей сварочного тока ванны приводит к появлению в расплаве массовых ponderomotorных сил  $F$ :

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B},$$

где  $\vec{j}$  — вектор плотности сварочного тока, взаимодействующего с магнитным полем, определяемым вектором индукции.

Величина и направление действия силы  $F$ , необходимые для обеспечения заданных характеристик движения расплава при ЭМП, регулируются соответствующим изменением индукции  $B$  и частоты реверсирования управляющего магнитного поля (УМП). Объектами управления при ЭМП являются тепломассоперенос в сварочной ванне и кинетика ее кристаллизации.

Установлено, что оптимальными являются условия перемещения, при которых происходят периодические, с возможно большей частотой колебания градиента температур перед фронтом кристаллизации на всей его протяженности. Для этого необходимо, чтобы за время между двумя последовательными реверсированиями движения потока расплава перемещался его тепловой фронт на всю длину кристаллизующей части ванны без перехода через ее продольную ось. Оптимальным условиям ЭМП соответствуют измельчение и повышение однородности структуры, предупреждение образования пор, получение швов, минимально склонных к образованию кристаллизационных трещин, стабилизация механических свойств швов на уровнях их максимальных значений, достигаемых при тех же способах сварки, но без ЭМП.

Сварочная ванна, характеризующаяся малым объемом расплава и высокой плотностью в нем электрического тока, является идеальным объектом для применения ЭМП, поскольку необходимые для достижения заданных характеристик перемещения силы  $F$  могут быть получены при относительно малых значениях индукции ( $B$ ) УМП. Это позволяет применять маломощные и малогабаритные электромагниты ввода УМП (ЭМ), что особенно важно при дуговой сварке, учитывая ограниченную доступность зоны сварки и необходимость сохранения маневренности сварочного инструмента. Электромагниты конструктивно совмещают со сварочными горелками или мундштуками. Заданную программу изменения напряжения питания обмотки электромагнита и, соответственно, параметров УМП обеспечивают применением специальных схем управления, выполненных в виде конструктивно самостоятельных блоков — аппаратов управления ЭМВ.

Простейшие программы изменения амплитуды или частоты реверсирования тока питания ЭМ при управлении сварочной дугой значительно усложняются при осуществлении ЭМП жидкого металла сварочной ванны. Поэтому системы управления ЭМВ универсального назначения должны обеспечивать заданные условия ЭМП, в том числе при сварке как на постоянном, так и на переменном токе, а также при импульсно-дуговой сварке (ИДС). В современных аппаратах управления ЭМП решение этой задачи достигается путем питания обмотки

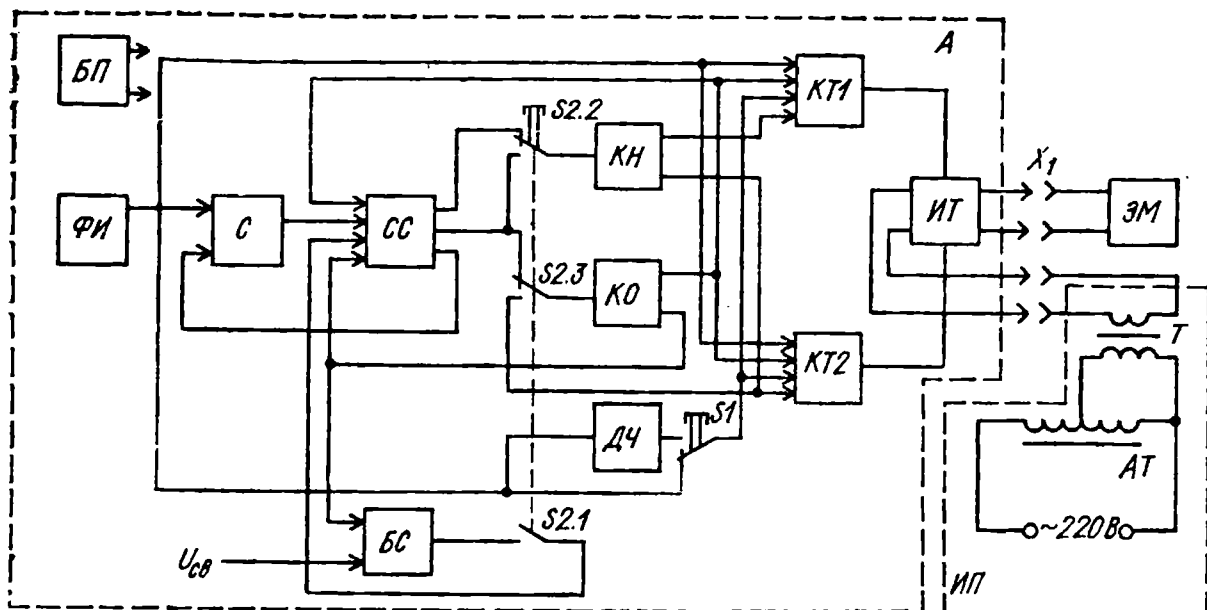


Рис. 2.53. Функциональная схема системы управления ЭМВ:  
А — аппарат управления

ЭМВП реверсируемы с требуемой частотой группами униполярных импульсов, выделенных однополупериодным выпрямлением из синусоидального напряжения промышленной частоты. При этом текущее значение  $B_0$  индукции УМП изменяется от нуля до амплитудного  $B_m$  по закону:

$$B_0 = \begin{cases} B_m \sin \omega t & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ 0 & \text{при } \frac{T}{2} \leq t \leq T, \end{cases}$$

где  $T$  — период сетевого напряжения;  $\omega = 2\pi/T$ .

Чтобы расширить технологические возможности сварки с ЭМП, в аппаратах предусматривается регулирование скважности импульсов тока электромагнита  $I_{ЭМ}$  и временных задержек  $t_3$  между последовательными группами униполярных импульсов  $I_{ЭМ}$ , а также синхронизация начала отработки заданной программы изменения напряжения питания ЭМ с передним фронтом импульса сварочного тока при ИДС.

Состав и работа типовой схемы управления ЭМВ поясняется рис. 2.53 и 2.54. Блок питания  $БП$  преобразует напряжение сети в требуемое для работы схемы. Формирователь тактовых импульсов  $ФИ$  преобразует пониженное  $БП$  напряжение сети в регулируемое по фазе последовательность униполярных прямоугольных импульсов  $U_{ФИ}$  (рис. 2.53 а), поступающих на входы счетчика  $С$ , транзисторных ключей  $КТ1$  и  $КТ2$  и делителя частоты  $ДЧ$ . Схема совпадения  $СС$  формирует сигнал  $U_{СС}$ , поступающий на коммутаторы направлений  $КН$  и операций  $КО$  по окончании отсчета блоком  $С$  заданного временного интервала («импульсов» или «паузы» УМП). По сигналам  $U_{СС}$  коммутатор  $КН$  управляет работой ключей  $КТ1$  и  $КТ2$  и инвертора тиристорного  $ИТ$ , собранного по мостовой схеме. Поочередное включение пар тиристоров инвертора при питании его напряжением сетевой частоты приводит к прохождению по обмотке электромагнита  $ЭМ$  (рис.2.53) однополупериодно выпрямленных импульсов тока в направлении,

определяемом состоянием выхода КН (рис. 2.54, а). Длительность  $t_p$  прохождения тока  $I_{эм}$  между последовательными его реверсированиями определяется настройкой временного интервала «импульсы ЭМП» счетчика С.

Чередование операций отсчета «импульсов» или «пауз» между группами встречно направленных импульсов тока  $I_{эм}$  обеспечивается коммутатором КО, который получает сигнал переброса от СС (при дуговой сварке) или от КН (при ИДС). Временная диаграмма, поясняющая работу системы управления ЭМВ при дуговой сварке с введением задержки  $t_3$  между импульсными последовательностями  $I_{эм}$ , показана на рис. 2.54, б. Блок ДЧ обеспечивает необходимую скважность УМП при подключении переключателем S1 его выхода на входы ключей КТ1 и КТ2. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы управления ЭМВ при скважности импульсов УМП ( $Q = 4$ ), показаны на рис. 2.54, в.

Включение блока синхронизации БС сигналом  $U_{св}$ , снимаемым со сварочной цепи, обеспечивает при нажатой кнопке S2 работу схемы синхронно с импульсами сварочного тока при управлении процессом ИДС. В момент начала импульса сварочного тока  $I_{идс}$  с блока БС приходит сигнал, разрешающий работу СС, при прекращении импульса  $I_{идс}$  счетчик С срабатывается в «0» и с этого момента находится в режиме готовности (рис. 2.54, в). Особенность работы схемы при ИДС — отсчет временных интервалов изменения тока ЭМВП  $I_{эм}$ , начиная с «паузы», определяющей время задержки  $t_3$  включения УМП (рис. 2.54, г) и необходимой для обеспечения требуемой глубины проплавления основного металла.

Исполнительная часть системы — электромагнит ЭМ (рис. 2.53), получающий питание от источника питания ИП через ИТ. В состав ИП входят автотрансформатор АТ для регулирования напряжения питания ЭМ и разделительный трансформатор Т, ограничивающий напряжение питания ЭМ согласно нормам охраны труда.

Аппараты управления ЭМВ (рис. 2.53—А) и источники питания ЭМ (рис. 2.53—ИП) объединяют в конструктивно-самостоятельный блок, на панели которого размещены все органы настройки программы изменения УМП и контроля его параметров.

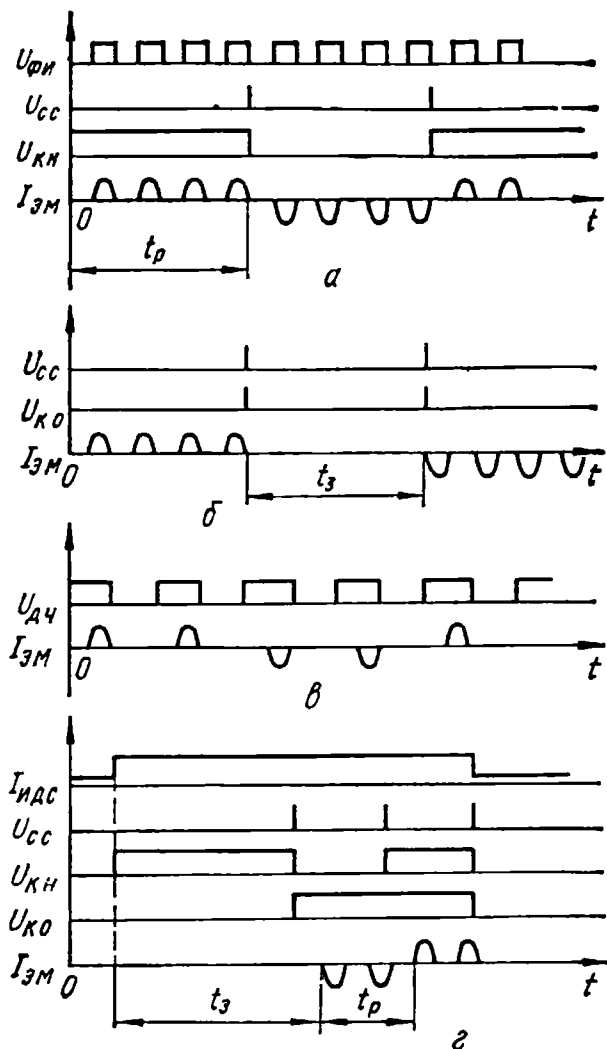


Рис. 2.54. Временные диаграммы:

а, в — при управлении процессами дуговой сварки и скважности импульсов управляющего магнитного поля 2 и 4 соответственно; б — при временной задержке между импульсными последовательностями тока ЭМВП ( $I_{эм}$ ); г — при управлении ИДС

Очередная задача — создание замкнутых систем управления качеством сварных швов по параметрам кристаллизации и глубине проплавления основного металла с применением ЭМВ в качестве регулирующих. Были проведены лабораторные испытания системы, в которой текущие значения фактической скорости перемещения фронта кристаллизации ( $v_{кр.ф}$ ) определяются сканирующим пирометрическим датчиком на основе фотодиодов, работающих в инфракрасной области спектра. Выходное напряжение датчика сравнивается с опорным, соответствующим заданному значению  $v_{кр.ф}$ , результирующий сигнал представляется в цифровом виде и после обработки цифроаналоговым преобразователем подается на затвор полевого транзистора как переменного резистора фазосдвигающей цепи в составе *ФИ* (см. рис. 2.52).

### 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

#### 3.1. Электрошлаковый процесс как объект управления. Классификация систем регулирования

Шлаковую ванну можно рассматривать как нелинейное активное сопротивление, зависящее от температуры расплавленного шлака, размеров и формы шлаковой ванны, размеров, относительного расположения и глубины погружения электродов в шлаковую ванну. Кривые тока и напряжения при сварке переменным током, зафиксированные осциллографом, представляют собой синусоиды, совпадающие по фазе. Нелинейность шлаковой ванны проявляется на действующих значениях тока и напряжения только при сравнительно медленном их изменении [55].

Тепловая инерция шлаковой ванны велика. Нагрев электрода происходит главным образом за счет контакта его с расплавленным шлаком. С увеличением скорости подачи электрода возрастают глубина погружения его в шлак и температура шлака, особенно в объеме между торцом электрода и поверхностью металлической ванны. Сокращение расстояния между торцом электрода и поверхностью металлической ванны, а также повышение температуры шлака приводят к возрастанию проводимости между электродом и металлической ванной и соответствующему увеличению тока (рис. 3.1).

Качество сварного соединения при электрошлаковой сварке (ЭШС) так же, как и при других способах сварки, определяется соответствием комплекса механических свойств шва и околошовной зоны свойствам основного металла. Снижение качества сварного соединения и появление в шве дефектов физического и металлургического характера (непроваров, подрезов, наплывов, рыхлости по оси шва, неметаллических включений, пор, трещин) — следствие нарушения установленной технологии и прежде всего параметров сварочного режима.

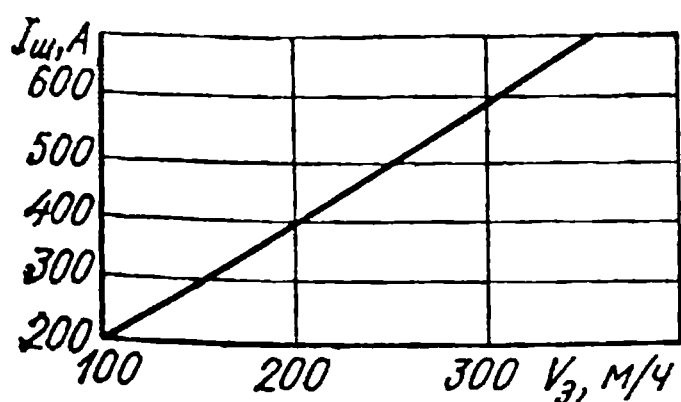


Рис. 3.1. Изменение тока  $I_{ш}$  шлаковой ванны с ростом скорости подачи электрода  $V_{э}$  (для электродной проволоки диаметром 3 мм)

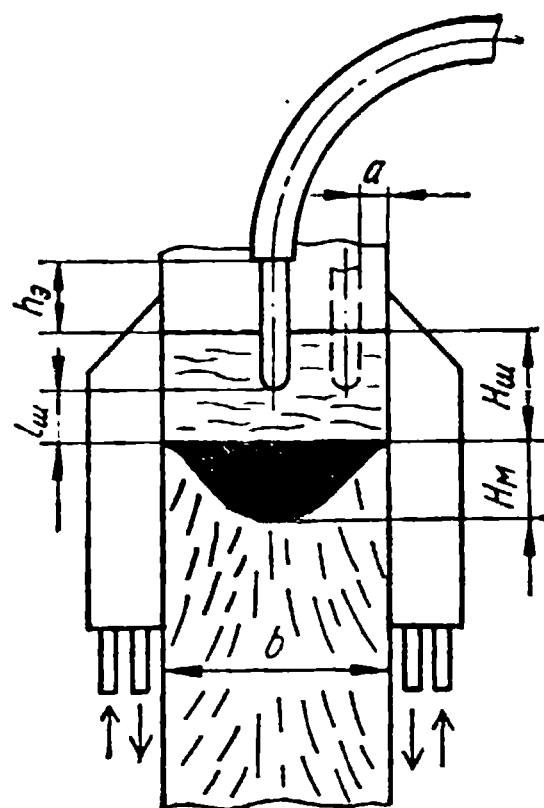


Рис. 3.2. Схема процесса ЭШС ( $b$  — толщина заготовок)



Режим ЭШС в сравнении с режимом дуговой сварки определяется значительно большим количеством параметров: током и падением напряжения на ванне  $I_{ш}$  и  $U_{ш}$ , поперечным сечением электрода  $F_э$ , глубиной шлаковой  $H_{ш}$  и металлической  $H_m$  ванн (рис. 3.2), «сухим» вылетом электрода  $h_э$ , положением конца электрода относительно зеркала металлической ванны  $l_{ш}$ , скоростью сварки  $V_{св}$ , скоростью поперечных перемещений электродов  $V_n$ , приближением  $a$  и выдержкой электродов у ползунов  $\tau$ , родом тока и полярностью.

Особенность процесса ЭШС — возможность его устойчивого протекания при жестких и пологопадающих внешних характеристиках источников питания. При низком напряжении холостого хода уменьшается вероятность случайного возбуждения дуги между электродом и металлической ванной, упрощается настройка режима.

Другой важной особенностью процесса ЭШС является бо́льшая, чем при дуговой сварке, взаимосвязанность параметров режима. Так, сварочный ток  $I_{ш}$  зависит не только от  $U_{ш}$ ,  $V_n$ , вылета электрода  $l_в$ , но и от зазора  $\delta$  между кромками свариваемых деталей и скорости сварки. Однако все эти факторы оказывают слабое влияние на  $I_{ш}$  и главным регулирующим воздействием на сварочный ток считают скорость подачи электрода  $V_n$ .

Падение напряжения  $U_{ш}$  зависит от глубины погружения электрода в шлак, равной разности  $(l_в - h_э)$ , удельного сопротивления шлака ( $\rho_{ш}$ ), сопротивления вылета электрода. Увеличение  $U_{ш}$  сопровождается увеличением расстояния  $l_{ш}$  и уменьшением проводимости ванны. Избыток мощности идет на дополнительное расплавление основного металла. При снижении напряжения  $U_{ш}$  величина  $l_{ш}$  уменьшается и проводимость ванны возрастает. Снижается средняя температура шлаковой ванны, что может привести к непроварам. При малых  $U_{ш}$  возможен местный перегрев шлака и его вскипание, которое обычно сопровождается образованием дуги и нарушением процесса ЭШС. При заданном токе  $I_{ш}$  напряжение  $U_{ш}$  можно регулировать в значительных пределах изменением э. д. с. источника питания  $E_{н.п}$  или сопротивления сварочной цепи. Однако в последнем случае теряются преимущества, определяемые применением при ЭШС источников питания с жесткой характеристикой. Поэтому регулирование процесса ЭШС воздействием на сопротивление сварочной цепи не применяется.

Глубина ванны  $H_{ш}$  определяется уровнем зеркала металлической ванны относительно ползунов. Воздействием на скорость  $V_n$  или на скорость перемещения ползунов  $V_{св}$  можно регулировать уровень металлической ванны относительно ползунов и ее глубину  $H_m$ . Для компенсации уменьшения величины  $H_{ш}$  в результате вытекания из ванны части шлака могут использоваться системы дозирования флюса.

Остальные параметры режима либо нельзя регулировать в процессе сварки (зазор  $\delta$ , площадь поперечного сечения электрода), либо они являются производными от сварочного тока, напряжения сварки и скорости подачи электродной проволоки. К точности воспроизведения поперечных колебаний электрода не предъявляются жесткие требования, поэтому стабилизация их с помощью автоматических устройств не производится.

Нормальный ход процесса ЭШС нарушают возмущения, возникающие:

1) вследствие изменений зазора между кромками ( $\tilde{\delta}$ ) в связи с низким качеством подготовки и сборки заготовок, сварочными деформациями;

2) непосредственно в зоне сварки в результате изменения физико-химических свойств шлака ( $\tilde{\rho}_{ш}$ ), электродной проволоки и при электромагнитных явлениях;

3) вследствие изменения моментов нагрузки на валах приводных двигателей подачи электродной проволоки ( $\tilde{v}_{п.э}$ ) и перемещения аппарата ( $\tilde{v}_{св}$ ), изменения вылетов ( $\tilde{l}_в$ ,  $\tilde{h}_э$ ) электродной проволоки, нестабильных контактов в токоподводящих мундштуках, изменений характеристик отдельных схем регулирования;

4) при изменениях напряжения сети ( $\tilde{u}_c$ ) и параметров сварочной цепи;

5) в зоне сварки вследствие вытекания из ванны части шлака ( $\tilde{h}_{ш}$ ) и непостоянства расположения формирующих шов ползунов относительно границы металл — шлак.

Эти возмущения могут быть нерегулярными и периодическими, существовать длительное время и быть кратковременными. При длительном действии таких возмущений, как изменение физико-химических свойств шлака и электродной проволоки, изменение характеристик отдельных элементов схемы регулирования, нельзя сохранить заданное качество сварных соединений, выполненных ЭШС (рис. 3.3).

Анализ влияния различных возмущений на процесс ЭШС показывает, что практически невозможно компенсировать отклонение одного параметра без нарушения геометрических размеров шва, доли основного металла в шве, термического цикла и т. п. Поэтому для получения качественных сварных соединений необходимо поддерживать с требуемой точностью все параметры режима сварки или изменять их по определенному закону, если это нужно по технологическим соображениям.

При создании систем автоматического регулирования ЭШС особое внимание следует обращать на отработки ими возмущений, обусловленных изменениями разделки шва ( $\tilde{\delta}$ ) и возникающих вследствие колебаний напряжения сети ( $\tilde{u}_c$ ), так как они отражаются на напряжении и токе сварки, на глубинах шлаковой и металлической ванн, приводят к изменению геометрических размеров швов и появлению в них дефектов.

Режим сварки приходится выбирать с определенным запасом, чтобы свести к минимуму влияние возмущений, устранить которые невозможно. Поэтому перспективна система регулирования процесса сварки, содержащая математическую модель процесса, вычисляющая и реа-

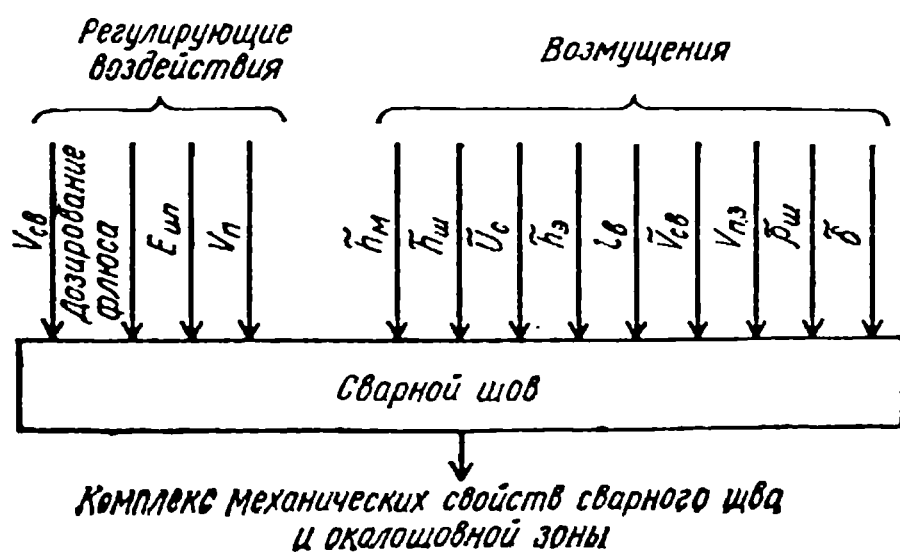


Рис. 3.3. Сварной шов как объект управления при ЭШС

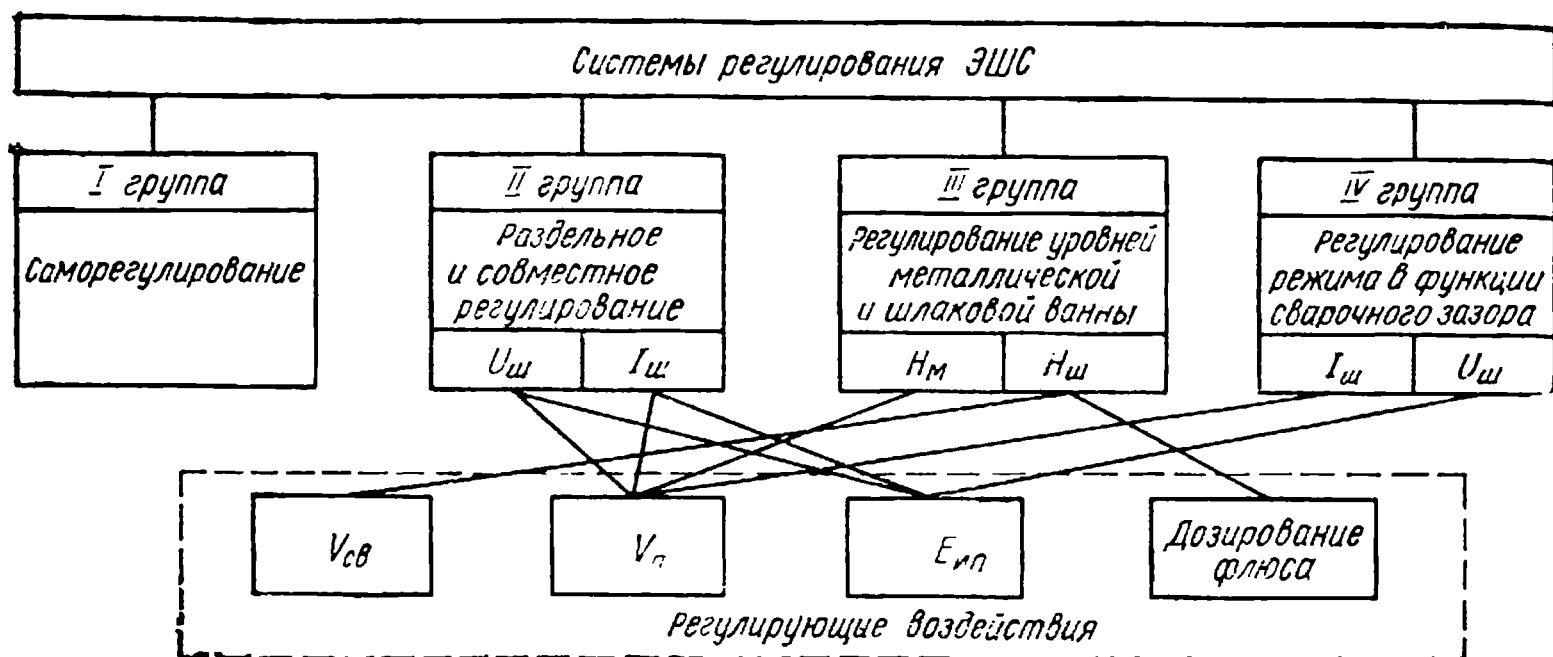


Рис. 3.4. Классификация систем автоматического регулирования процесса ЭШС

лизующая через соответствующие регуляторы оптимальный режим сварки с учетом текущего состояния разделки и других факторов. Это требует создания надежных датчиков параметров процесса ЭШС.

Процесс ЭШС имеет много общего с дуговой сваркой с точки зрения регулирования основных энергетических параметров режима. Оба процесса обладают свойством саморегулирования, сходны также кривые устойчивой работы, вольт-амперные характеристики, снятые при постоянных скоростях подачи, совпадают и некоторые регулирующие воздействия ( $V_p$ ,  $E_{н.п}$ ). Поэтому основные способы регулирования и схемы регуляторов тока и напряжения ЭШС подобны применяемым при дуговой сварке.

На рис. 3.4. приведена классификационная схема систем регулирования процесса ЭШС, которая состоит из четырех основных групп: системы, основанной на свойстве саморегулирования процесса; системы с регулятором одного или обоих ( $U_{ш}$ ,  $I_{ш}$ ) энергетических параметров; системы регулирования уровней металлической и шлаковой ванны; системы регулирования режима в функции сварочного зазора.

### 3.2. Системы регулирования тока и напряжения

В системах регулирования напряжения и тока можно использовать как свойства самовыравнивания (саморегулирования) процесса ЭШС, так и регулирующих воздействий на скорость подачи электрода ( $V_p$ ) или э. д. с. источника питания ( $E_{н.п}$ ) (см. рис. 3.4.).

**Системы саморегулирования.** Возникающие в процессе ЭШС при постоянной скорости подачи по тем или иным причинам кратковременные отклонения длины «мокрого» вылета самопроизвольно ликвидируются, если причина возникновения отклонения исчезла. Если же возмущение, нарушившее процесс, сохраняется длительно, то процесс переходит в новое состояние, отличное от исходного. Саморегулирование плавления электродной проволоки при ЭШС в достаточной мере интенсивно, и сварочный ток практически не изменяется при действии на систему любых возмущений. Статические характеристики  $U_{ш}=f(I_{ш})$  сварочной головки с постоянной скоростью подачи электродной проволоки представляют собой отрезки прямых, почти перпендикулярных к оси  $I_{ш}$  (рис. 3.5) и по форме аналогичны характеристикам системы саморегулирования дуги.

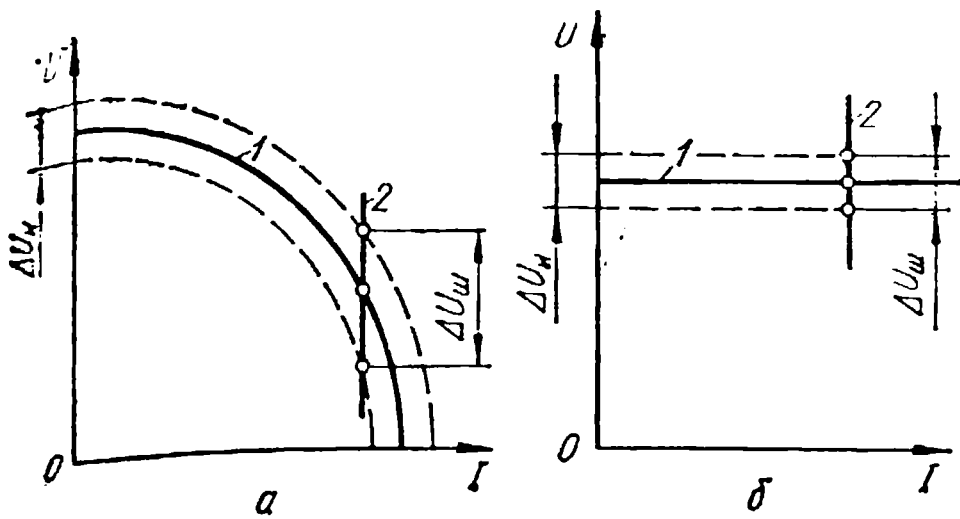


Рис. 3.5. Пределы колебаний падения напряжения на шлаковой ванне  $\Delta U_{ш}$  при смещении крутопадающей (а) и жесткой (б) характеристик источника питания в пределах  $\Delta U_{н}$ , вызванных колебанием напряжения сети:

1, 2 — статические характеристики источника питания и сварочной головки соответственно

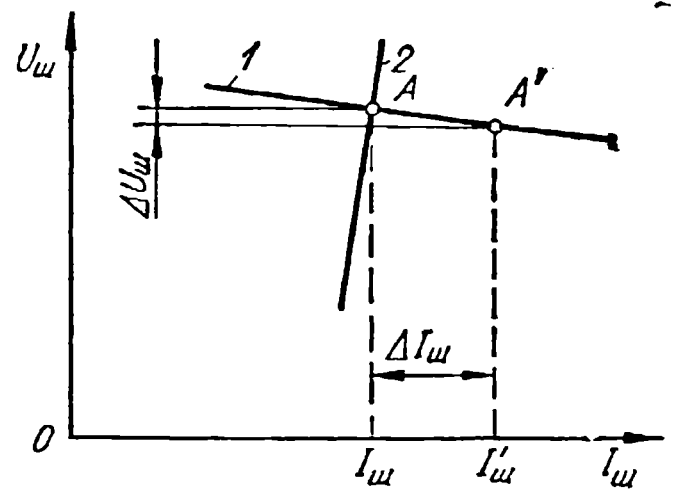


Рис. 3.6. Отработка возмущения по напряжению при саморегулировании шлаковой ванны:

1 — статическая характеристика источника питания; 2 — статическая характеристика процесса саморегулирования; А — точка устойчивого режима ЭШС

Наиболее сильное влияние на режим сварки оказывают колебания напряжения питающей сети ( $U_c$ ), если внешняя характеристика источника питания со вторичной сетью крутопадающая (рис. 3.5, а). При использовании источников питания (например, трансформатора) с жесткой внешней характеристикой, которые широко применяются в практике ЭШС, относительные изменения  $U_{ш}$  приблизительно равны относительным изменениям напряжения  $U_{н}$  (рис. 3.5, б).

Из характеристики  $U_{ш} = f(I_{ш})$  (рис. 3.6) видно, что увеличению падения напряжения  $U_{ш}$  соответствуют снижение проводимости шлаковой ванны и величины  $I_{ш}$ . Проводимость можно снизить лишь при уменьшении «мокрого» вылета электрода, равного длине части электрода, погруженной в шлаковую ванну. При чрезмерном повышении  $U_{ш}$  «мокрый» вылет может настолько уменьшиться, что дальнейшее протекание процесса станет невозможным. Между поверхностью шлаковой ванны и электродом возбуждается дуга, оголению электрода способствуют электромагнитные силы.

Снижению  $U_{ш}$  соответствуют увеличение «мокрого» вылета электрода и возрастание проводимости ванны, при этом процесс переходит в новое состояние (точка А' на рис. 3.6). Средняя температура шлаковой ванны падает, что увеличивает вероятность образования непровара. При чрезмерном снижении напряжения  $U_{ш}$  расстояние  $l_{ш}$  (см. рис. 3.2) оказывается настолько малым, что возникает местный перегрев шлака и его вскипание, несмотря на пониженную среднюю температуру шлаковой ванны. Вскипание шлака в объеме между концом электрода и поверхностью металлической ванны сопровождается образованием дуги. Рассмотренные случаи подтверждают необходимость ограничения колебаний  $U_{ш}$ . Кроме того, определяющим параметром, который непосредственно влияет на ширину провара кромок свариваемых изделий, является напряжение на шлаковой ванне. Поэтому стабилизация напряжения на шлаковой ванне — необходимое условие для получения равномерной ширины провара.

Время переходного процесса при саморегулировании ЭШС пропорционально квадрату характерного линейного размера электрода (например, квадрату диаметра электродной проволоки или квадрату

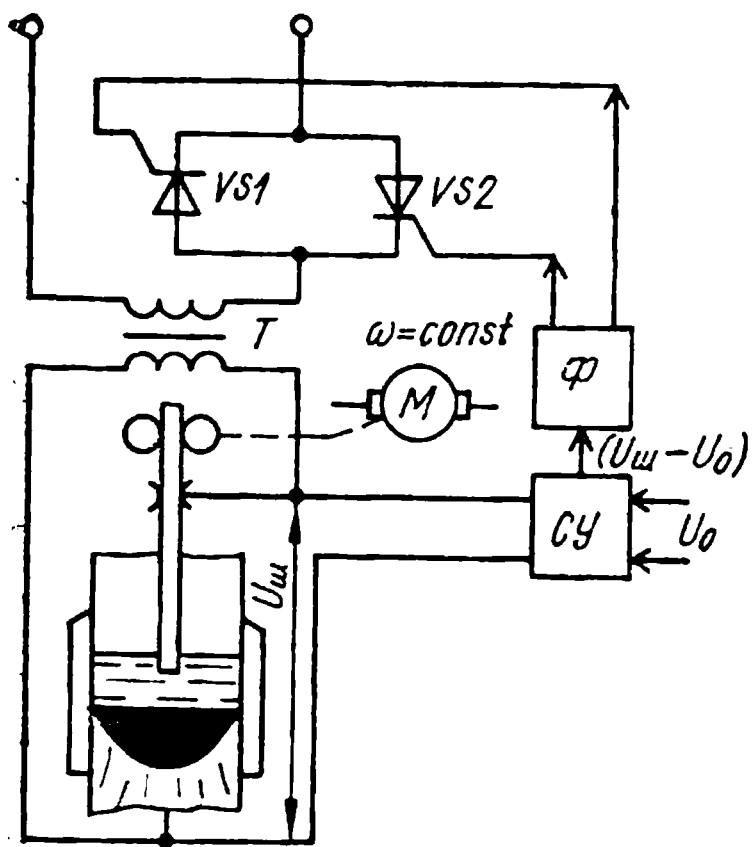


Рис. 3.7. Система регулирования  $U_{ш}$  с воздействием на э. д. с. источника питания

толщины пластины). С увеличением размеров электрода время восстановления нарушившегося по тем или иным причинам процесса резко возрастает. Однако большая тепловая инерционность шлаковой ванны позволяет получить удовлетворительную стабилизацию энергетических параметров процесса ЭШС при его саморегулировании, иногда и при сварке пластинчатыми электродами с большим поперечным сечением.

Системы с регулятором одного параметра. В тех случаях, когда колебания напряжения сети значительны и к качеству соединений предъявляются жесткие требования, сварочные аппараты целесообразно комплектовать регуляторами напряжения,

воздействующими на источник питания при постоянной скорости подачи электродной проволоки. Наиболее просто такая система реализуется с помощью тиристорного контактора, последовательно включенного в первичную цепь сварочного трансформатора (рис. 3.7). Сварочный трансформатор  $TС$  подключен к сети с помощью пары (или нескольких параллельных пар) встречно-параллельно соединенных тиристоров  $VS1, VS2$  с фазовым управлением.

В отличие от электродуговой сварки под флюсом такое включение вполне допустимо, поскольку шлаковая ванна представляет собой активное сопротивление, поэтому перерывы в протекании сварочного тока в каждом полупериоде не снижают устойчивости процесса сварки. Применение тиристоров позволяет получить высокие динамические схемы. Регулируемое напряжение сварки  $U_{ш}$  сравнивается с опорным заданным напряжением  $U_0$  в сравнивающем устройстве  $СУ$ . Усиленный разностный сигнал  $(U_{ш} - U_0)$  подается на фазовращающий мост  $\Phi$ , который управляет тиристорами  $VS1$  и  $VS2$ . При достаточно высоком коэффициенте усиления обеспечивается точность стабилизации напряжения. Система исчерпывает весь «запас регулирования» и теряет управление при полностью открытых тиристорах, что соответствует максимально допустимому падению напряжения сети. В сторону компенсации повышений напряжения сети «запас регулирования» схемы не ограничен.

В некоторых случаях для упрощения системы отказываются от обратной связи по напряжению  $U_{ш}$  и используют регулирование по возмущению. При этом синтезируют такую схему управления тиристорами, чтобы изменение напряжения сети ( $U_c$ ) сопровождалось необходимым изменением угла отпирания тиристорov. Регулирование по возмущению дает возможность устранить влияние колебаний напряжения, но область применения его ограничена случаями, когда интенсификация процессов саморегулирования не требуется. Стабилизация же  $U_{ш}$  способствует интенсификации саморегулирования,



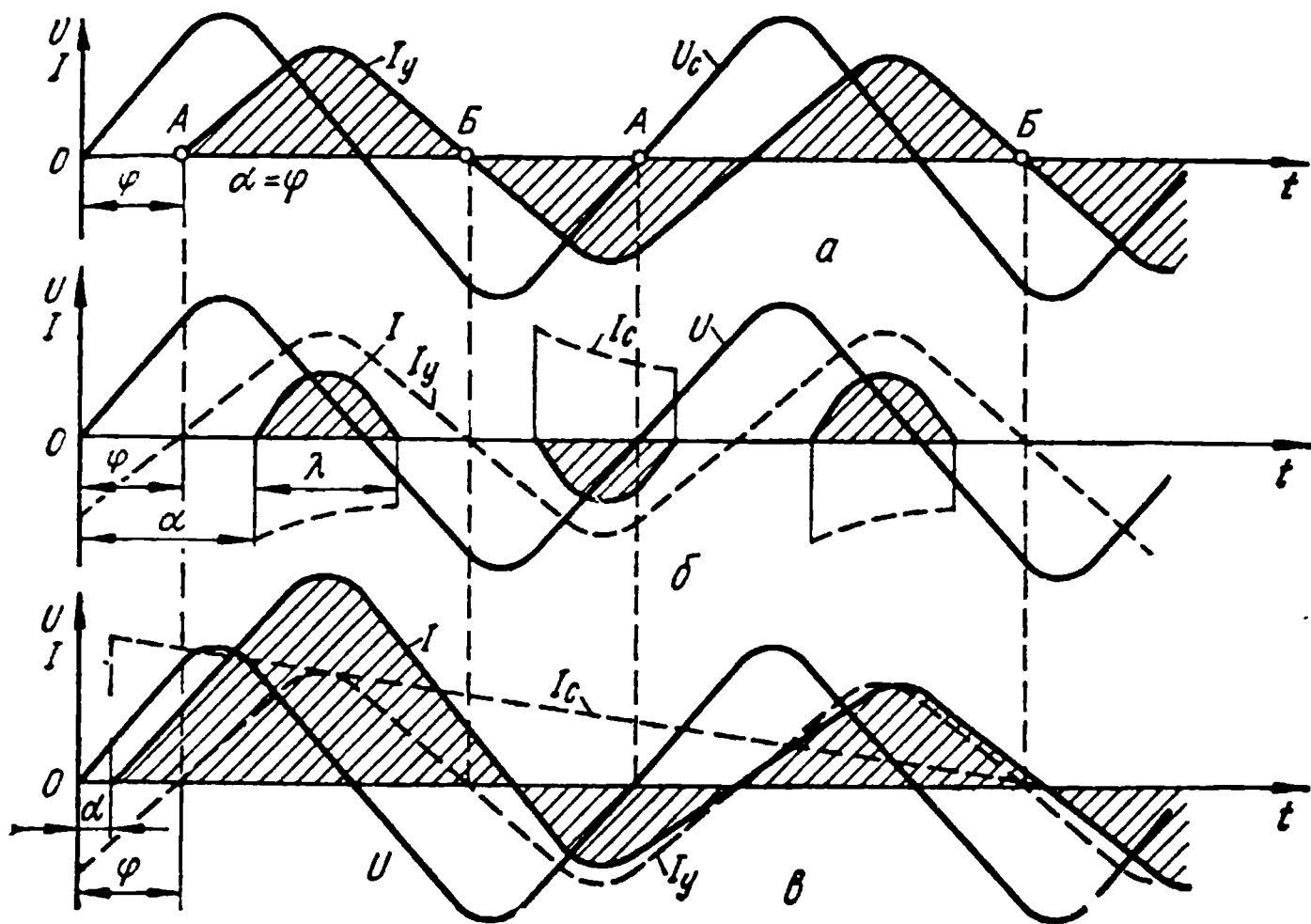


Рис. 3.8. Временные диаграммы токов и напряжений при работе тиристорного контактора на активно-индуктивную нагрузку в режиме фазового регулирования для случаев: а)  $-\alpha = \varphi$ ; б)  $-\alpha > \varphi$ ; в)  $-\alpha < \varphi$

особенно при относительно большом падении напряжения в источник питания и сварочной цепи.

По схеме на рис. 3.7 можно также построить регулятор в трехфазном исполнении.

Системы регулирования с тиристорными контакторами имеют существенный недостаток, свойственный всем устройствам с фазовым регулированием напряжения [55]: низкий коэффициент мощности, вызванный искажением формы кривой сварочного тока (рис. 3.8).

Ток  $I$ , проходящий через первичную обмотку сварочного трансформатора, отстает от  $U_c$  сети на угол сдвига фаз  $\varphi$  (рис. 3.8,а). Этот угол определяется соотношением активной и индуктивной составляющих полного сопротивления цепи.

Если в точках  $A$  включить тиристор, анод которого находится в этот полупериод под положительным потенциалом, а в точках  $B$  — тиристор, проводящий в противоположные полупериоды, то в нагрузке возникает непрерывный переменный ток, который будет существовать все время, пока подана команда на включение тиристоров. С увеличением угла  $\alpha$  включения тиристоров (рис. 3.8,б) автоматически уменьшается угол проводимости  $\lambda$  и соответственно действующий ток через нагрузку. Если  $\alpha = \varphi$  (рис. 3.8,а), то переходный процесс отсутствует. Ток принимает сразу свое наибольшее установившееся значение  $I_y$ ; такое включение называют полнофазным. При  $\alpha > \varphi$  (рис. 3.8,б) ток в каждой полуволне определяется разностью существующих во время проводимости тиристора установившегося  $I_y$  и свободного  $I_c$  токов. Поэтому снижается наибольшее значение тока и появляются разрывы между его полуволнами.

Действующее значение уменьшается, и тем сильнее, чем больше угол  $\alpha$ .



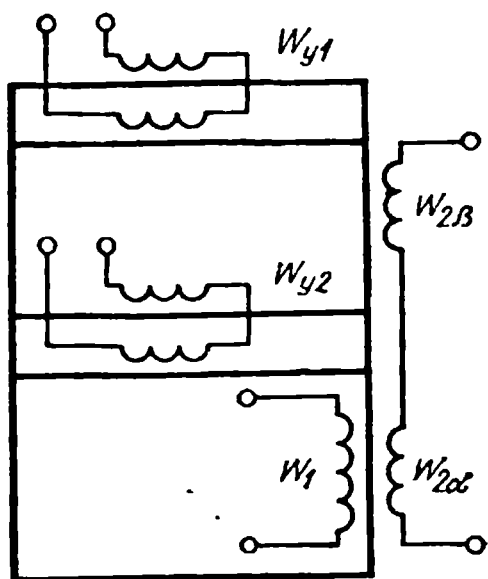


Рис. 3.9. Электрическая схема сварочного трансформатора с регулированием напряжения магнитной коммутацией

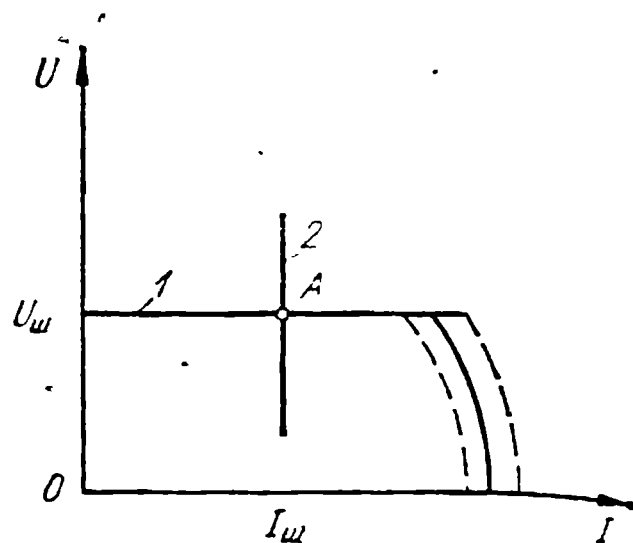


Рис. 3.10. Внешние характеристики источника питания с регуляторами напряжения, воздействующим на э. д. с. источника питания (1), и статическая характеристика регулятора тока (2), воздействующего на скорость подачи электрода

На рис. 3.8, в показан наиболее тяжелый случай асимметричной работы тиристорного регулятора, который может привести к работе в «выпрямительном режиме»; если импульсы отпирания тиристоров имеют малую длительность. Так, включение одного из тиристоров с углом  $\alpha < \varphi$  не позволит другому тиристорному включиться в момент появления импульса управления, так как продолжается проводимость первого тиристора; когда возникает принципиальная возможность включения второго тиристора, импульса управления уже не будет и контактор будет работать как однополупериодный выпрямитель.

Наиболее эффективная мера предупреждения «выпрямительного режима» — увеличение длительности управляющих импульсов. При этом в случае включения с  $\alpha < \varphi$  возникает начальная асимметрия полуволн тока (рис. 3.8, в), которая в дальнейшем исчезает.

В институте электросварки им. Е. О. Патона разработан тиристорный регулятор напряжения А-1307, состоящий из силовых тиристорных регуляторов, блока управления и устройства защиты. Регулятор снабжен устройством быстродействующей защиты от перегрузок и коротких замыканий, которое обеспечивает автоматическое повторное включение с плавным нарастанием угла отпирания тиристорных регуляторов при случайных и технических коротких замыканиях в сварочной цепи. Источники тока с управляемыми вентилями обладают жесткими внешними характеристиками. Они удобны в эксплуатации и могут быть использованы в системах автоматического регулирования.

На основе регулятора напряжения А-1307 разработан тиристорный прерыватель, который применяют при ЭШС с периодическим отключением тока (модуляцией мощности). Прерыватель позволяет отдельно регулировать длительность импульсов тока и паузы между ними, а также стабилизировать напряжение на ванне [55]. Принцип действия регулятора и его основные характеристики рассмотрены в прил. 14.

Для стабилизации напряжения при ЭШС используют также трансформаторы с магнитной коммутацией (рис. 3.9), в которых сварочное напряжение, снимаемое с обмотки  $W_2$ , регулируют путем подмагничивания постоянным током (с помощью управляющих обмоток  $W_{y1}$

и  $W_{y2}$ ) двух ярем трансформатора и перераспределения основного магнитного потока между ними. При этом соотношение между максимальной э. д. с.  $E_2$  вторичной обмотки определяется зависимостью

$$E_{2\max}/E_{2\min} \approx (W_{2\alpha} + W_{2\beta})/W_{2\alpha}.$$

По сравнению с трансформаторами с управляемыми вентилями трансформаторы с магнитной коммутацией надежнее (не боятся короткого замыкания и разрыва нагрузки) и имеют более высокий коэффициент мощности, но обладают пониженными динамическими свойствами [55].

Стабилизация напряжения с воздействием на скорость подачи электрода возможна при использовании источника питания с падающей внешней характеристикой. Однако стабилизация осуществляется за счет тока, что не всегда удовлетворяет требованиям технологии.

К системам регулирования одного параметра относятся системы стабилизации тока, применение которых целесообразно при сварке плавящимся мундштуком и при использовании электродов с большим поперечным сечением, когда процесс саморегулирования выражен слабо. В этих системах в качестве регулирующего воздействия применяют скорость подачи проволок (при сварке плавящимся мундштуком) либо скорость подачи массивного электрода. Применение системы стабилизации тока сварки с воздействием на скорость подачи электрода эффективно при использовании источников питания с жесткой характеристикой и относительно небольших колебаниях напряжения сети. В настоящее время по этому принципу разработаны автоматические регуляторы скорости подачи электрода для электрошлаковых процессов. Примером таких регуляторов может служить разработанный в институте электросварки им. Е. О. Патона быстродействующий электронно-электромашинный регулятор тока для электрошлакового переплава (ЭШП), который пригоден и для ЭШС пластинчатым электродом (см. прил. 15).

**Системы с регулированием двух параметров.** В тех случаях, когда системы с одним регулятором не дают желаемого эффекта, применяют системы одновременного регулирования тока и напряжения. Системы с двумя регуляторами используют при сварке длинными пластинчатыми электродами (когда необходимо компенсировать падение напряжения на пластине для получения постоянного напряжения на шлаковой ванне), при больших колебаниях напряжения питающей сети или при сварке швов с переменным поперечным сечением (когда требуется изменение режима сварки по заданной программе). Непрерывное программирование тока сварки наряду с регулированием напряжения обеспечивает плавное изменение теплового режима шлаковой ванны в течение всей сварки, что сохраняет заданную скорость наплавления металла шва и позволяет повысить его качество.

Системы могут быть образованы из рассмотренных регуляторов напряжения и тока, при этом возможны две системы. Первая система состоит из регулятора напряжения, воздействующего на э. д. с. источника питания, и регулятора тока, воздействующего на скорость подачи электрода. Статические характеристики регуляторов показаны на рис. 3.10. Точка пересечения характеристики  $A$  определяет

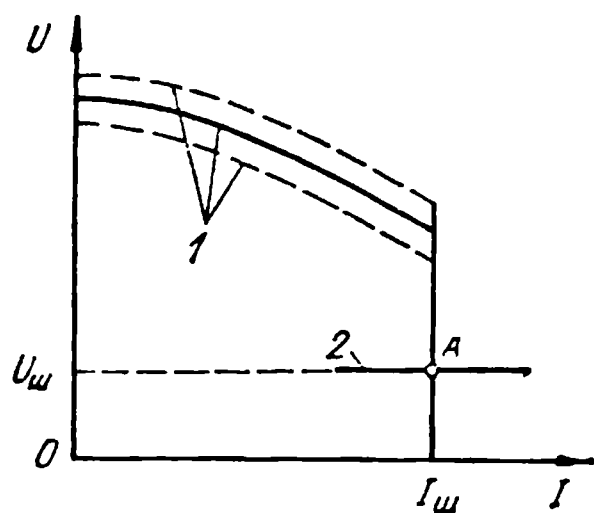


Рис. 3.11. Внешние характеристики источника питания с регулятором тока ( $I$ ) и статическая характеристика регулятора напряжения ( $2$ ) с воздействием на скорость подачи электрода

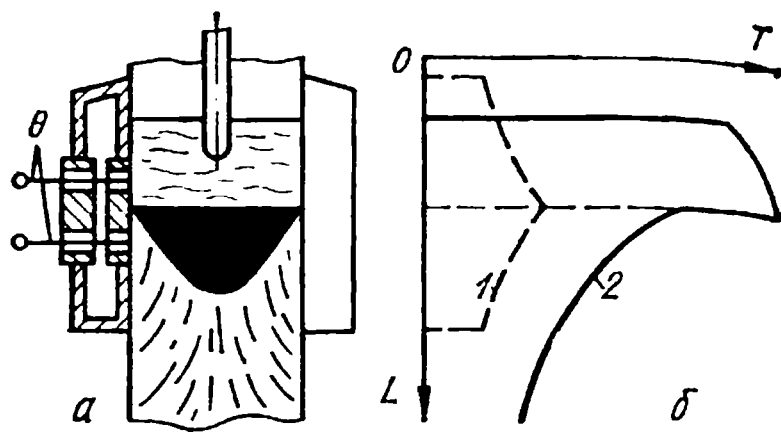


Рис. 3.12. Схема контроля уровня металлической ванны дифференциальной термопарой  $\Theta$  ( $a$ ) и распределение температуры  $T$  ( $b$ ) по высоте  $L$  ползуна;  $1$  — в ползуне;  $2$  — в зоне сварки

режим ЭШС. Вторая система содержит регулятор, стабилизирующий напряжение воздействием на скорость подачи, и регулятор, стабилизирующий ток воздействием на э. д. с. источника питания (рис. 3.11). По количеству элементов и стоимости указанные системы равноценны, однако первая система обладает большими технологическими возможностями, так как позволяет практически безынерционно стабилизировать напряжение источника питания.

### 3.3. Регулирование уровня металлической и шлаковой ванн

При ЭШС с использованием подвижных формирующих устройств — ползунов необходимо, чтобы уровень металлической ванны относительно ползунов сохранялся неизменным. Это достижимо, если в каждый момент времени (кроме начальной стадии) соблюдается условие

$$F_M V_{св} = F_э V_п, \quad (3.1)$$

где  $F_M$  — площадь поперечного сечения металла, необходимого для заполнения зазора и создания усиления шва;  $V_{св}$  — скорость перемещения аппарата;  $F_э$  — площадь поперечного сечения электродной проволоки;  $V_п$  — скорость подачи электродной проволоки.

Уровень металлической ванны можно регулировать, соответственно изменяя скорость подачи электрода ( $V_п$ ), скорость сварки ( $V_{св}$ ) или  $V_п$  и  $V_{св}$  одновременно. Однако применение регуляторов энергетических параметров, воздействующих на скорость  $V_п$ , а также вероятность появления возмущений по разделке шва, для компенсации которых необходимо также изменять  $V_п$ , не позволяют в полной мере применять схемы регулирования уровня ванны путем воздействия на этот параметр. Значительно большие возможности имеет система регулирования уровня ванны путем воздействия на скорость  $V_{св}$  перемещения аппарата вдоль свариваемого шва. Непостоянство  $V_{св}$  почти не отражается на режиме плавления электрода, в чем состоит основное преимущество такого способа регулирования.

Определение уровня металлической ванны относительно ползунов связано со значительными трудностями, вызванными тем, что необходимо регистрировать и управлять неэлектрической величиной,

а также тем, что металлическая ванна покрыта слоем расплавленного шлака. Поэтому основным элементом САР уровня металлической ванны являются датчики, которые должны обеспечивать минимальную погрешность измерения. Непосредственное получение информации об уровне металлической и шлаковой ванн производится следующими способами: термодатчиками; контактными датчиками; радиоактивными датчиками; индукционными датчиками.

**Термодатчики.** Наибольшее распространение получил способ контроля уровня ванны с применением дифференциальных термопар. К медному ползуну привариваются две константановые проволоки, образующие две встречновключенные термопары: константан — медь и медь — константан (рис. 3.12). Один спай располагается несколько выше требуемого уровня металла, другой — ниже. Результирующая э. д. с. термопар пропорциональна разности температур в местах спаев. Опытами установлено, что результирующая э. д. с. термопар равна нулю, когда уровень металлической ванны находится приблизительно посередине между точками приварки термопар. Разность двух термо- э. д. с. в дифференциальной схеме очень мала по величине и требует применения усилителей с высоким коэффициентом усиления. Результаты измерений в некоторой степени зависят также от толщины шлакового гарнисажа, амплитуды колебаний электрода, расхода охлаждающей жидкости. Известны дальнейшие усовершенствования этого метода: помещение автономного чувствительного термоэлемента внутри ползуна, изоляция его от расплавленной ванны и установка двух термоэлементов на разной высоте.

**Контактные датчики.** Способ измерения уровня металлической ванны с помощью контактного датчика, представляющего собой металлический щуп, является наиболее простым. Охлаждаемый водой вертикальный щуп помещается в зазор между свариваемыми изделиями на заданной высоте. Замыкание цепи щуп — изделие служит сигналом для управления процессом сварки. В другом случае щуп погружается в шлаковую ванну. Напряжение на щупе пропорционально длине шлакового промежутка между ним и жидким металлом ванны. Оно становится равным нулю, когда щуп касается основного металла. Опыт показал, что такие простейшие щупы недостаточно надежны в эксплуатации и обладают большой погрешностью.

Наиболее рационально применять горизонтальный медный щуп, изолируемый от накладки и вмонтированный в ползун. Такой щуп не зашлаковывается, не смачивается расплавленным металлом, обладает хорошей износостойкостью и позволяет выделить достаточный по величине электрический сигнал (рис. 3.13). Конец щупа не выступает за плоскость формирующего устройства, в которое он вмонтирован, что позволяет использовать устройство для сварки кольцевых швов. Питание щупа осуществляется от вторичной обмотки сварочного трансформатора через дроссель  $L$  (рис. 3.14). Напряжение щупа после выпрямления подается на резистор  $R$ . Потенциометр  $RP$  питается от независимого источника. В ветвь сравнения измерительного узла, образованного  $R$  и  $RP$ , включена обмотка  $L_A$  усилителя мощности  $A$  (например, ЭМУ), питающего двигатель  $M$  вертикального перемещения сварочного аппарата.

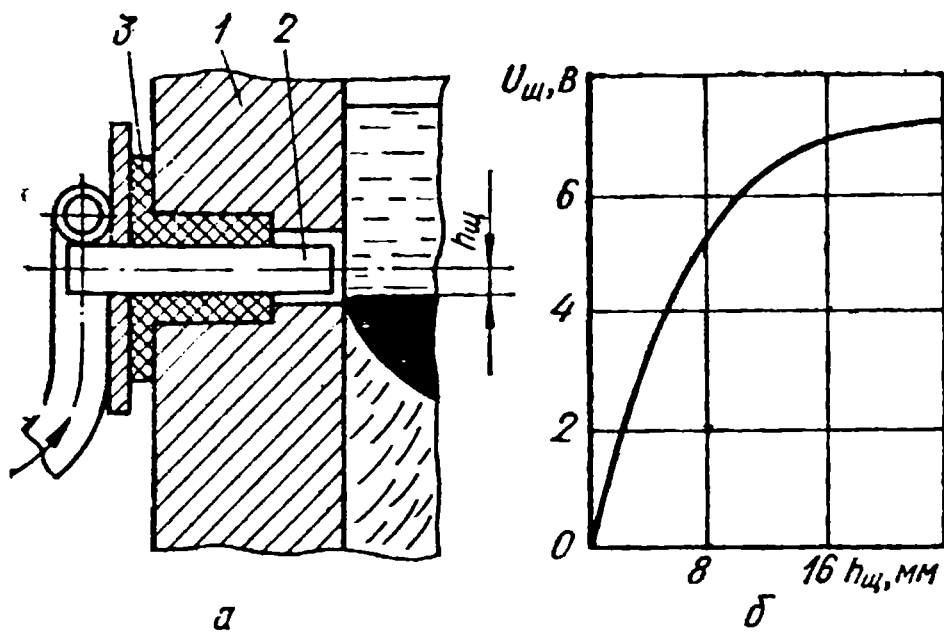


Рис. 3.13. Горизонтальный медный щуп (а) и зависимость падения напряжения ( $U_{щ}$ ) на нем от расстояния  $h_{щ}$  между щупом и зеркалом металлической ванны (б):

1 — формирующее устройство; 2 — щуп; 3 — изолирующая втулка

Если падение напряжения на щупе равно нулю, т. е. он замкнут на металлическую ванну, то схема управления выдает сигнал на перемещение сварочного аппарата вверх со скоростью, превышающей скорость образования шва. Благодаря этому щуп отрывается от металлической ванны и напряжение на нем становится отличным от нуля (рис. 3.13,б). Это напряжение сравнивается с заданным, снимаемым с  $RP$ , и в случае совпадения их схема управления выдает сигнал на остановку аппарата.

Уровень металлической ванны относительно щупа начинает повышаться вплоть до замыкания щупа на ванну, после чего цикл повторяется. Вентиль  $VD9$  (рис. 3.14) препятствует реверсированию двигателя  $M$ . Практика показала, что рассмотренный регулятор работает устойчиво при всех возможных режимах сварки. Недостаток его — невысокая эрозионная стойкость щупа.

Более надежна в работе система, в которой щуп вибрирует посредством генератора ультразвуковых колебаний (УЗК) и создает на его рабочей поверхности кавитацию жидкого металла или шлака. При этом обеспечивается более надежный контакт с измеряемой средой и уменьшается эрозия рабочей поверхности. Однако из-за сложности конструкции вибратора УЗК система не нашла широкого применения в промышленности.

**Радиоактивные датчики.** Применение радиоактивных изотопов значительно облегчает измерение уровня металлической ванны, так как исключается непосредственный контакт измерительного устройства со шлаковой и металлической ваннами. Принцип работы основан на разнице в коэффициентах поглощения гамма-излучения расплавлен-

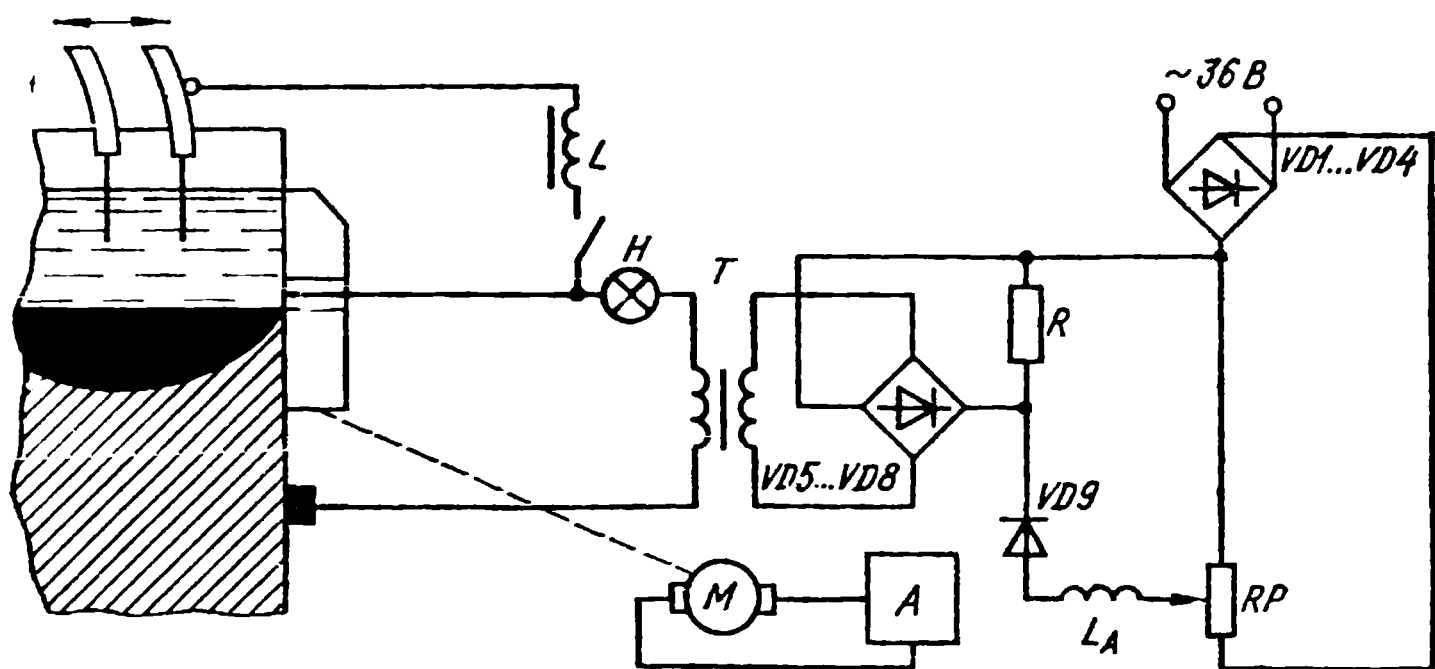


Рис. 3.14. Схема регулятора уровня металлической ванны с электрическим щупом



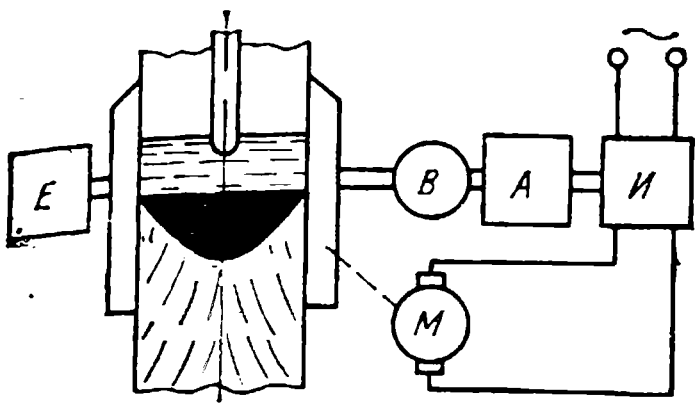
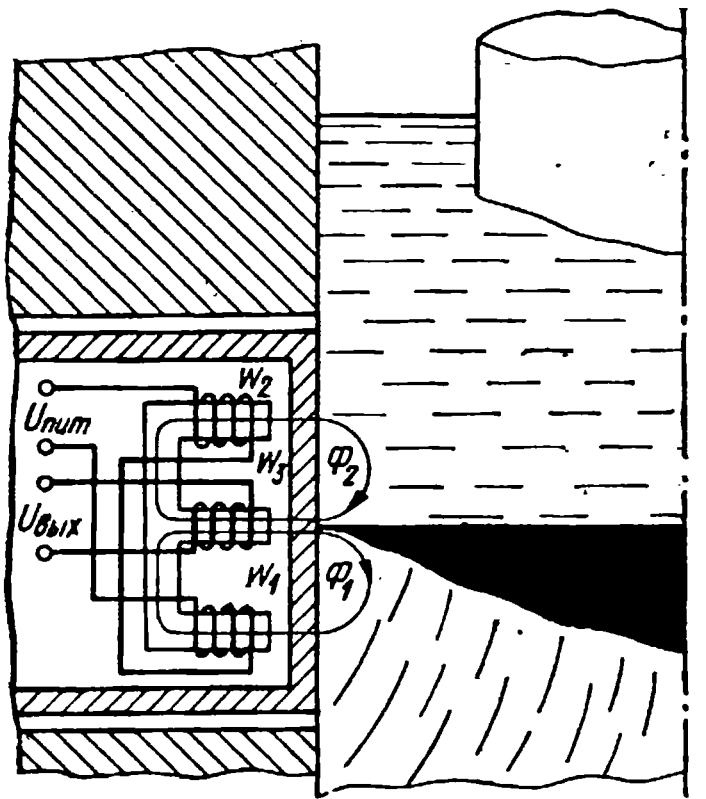


Рис. 3.15. Автоматический регулятор уровня ванны с применением радиоактивных изотопов

Рис. 3.16. Индукционный датчик уровня металлической ванны на Ш-образном сердечнике



ными шлаками и металлом. Схема регулятора, реализующего этот принцип, приведена на рис. 3.15. Для измерения уровня ванны перед одним из формирующих устройств располагается небольшой свинцовый контейнер  $E$ , в котором размещается определенное количество радиоактивного изотопа  $^{60}\text{Co}$ . В контейнере имеется щель, перекрываемая электромагнитным затвором, для выхода горизонтального пучка гамма-лучей, направленного через плавильную зону на счетную галогенную трубку  $B$ . Счетную трубку для защиты от нагрева помещают в охлаждаемый водой кожух. Свинцовый контейнер с толщиной стенок 30 мм позволяет безопасно работать на расстоянии 25—30 см от радиоактивного кобальта.

Импульсы напряжения, получаемые от счетной трубки  $B$  при облучении ее гамма-лучами, усиливаются, усредняются с помощью электронной схемы  $A$  и подаются на вход исполнительного органа  $И$ , который воздействует на скорость перемещения аппарата с помощью двигателя  $М$ . Чем больше толщина свариваемого металла, тем большим должно быть количество радиоактивного кобальта.

Разработанный в Институте электросварки им. Е. О. Патона регулятор показал вполне удовлетворительные результаты при электрошлаковой сварке металла толщиной 120 мм. Уровень металлической ванны поддерживался с точностью  $\pm 2$  мм.

**Индукционные датчики.** В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработан бесконтактный индукционный датчик (рис. 3.16), выполненный на Ш-образном разомкнутом магнитопроводе. Датчик размещен в замкнутой камере, смонтированной в один из формирующих ползунов. Две одинаковые намагничивающие обмотки  $W_1$  и  $W_2$  расположены на крайних стержнях магнитопровода, а измерительная обмотка  $W_3$  размещена на центральном стержне. Рабочие обмотки  $W_1$  и  $W_2$  включены таким образом, что в центральном стержне создаются встречно направленные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . При равенстве магнитных потоков  $\Phi_1 = \Phi_2$  в выходной измерительной обмотке  $W_3$  индуцируемая э. д. с. равна 0. Если на пути одного из потоков  $\Phi_1$  или  $\Phi_2$  поместить электропроводное немагнитное тело (расплавленный металл), в нем наводятся вихревые токи, уменьшающие соответственно поток  $\Phi_1$  или  $\Phi_2$ . При этом равенство магнитных потоков



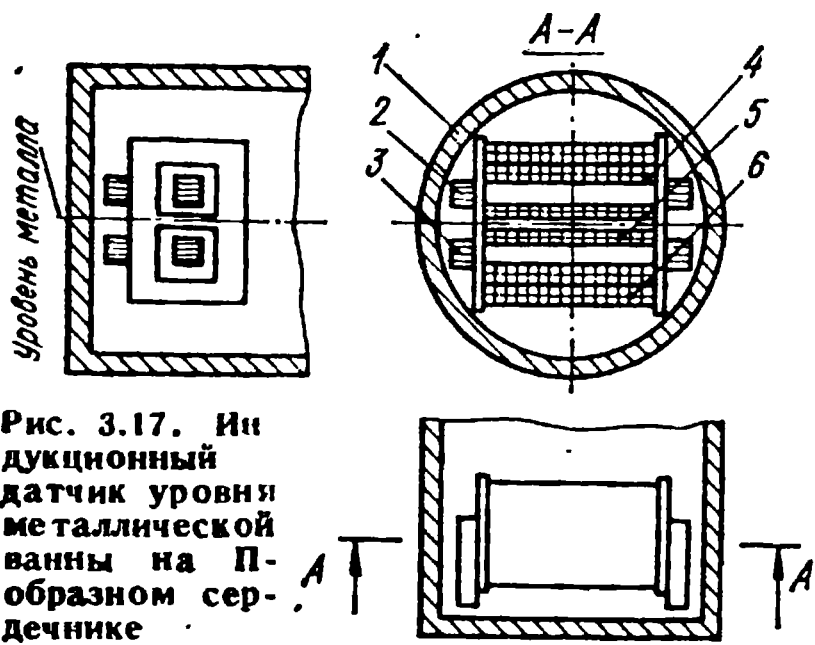


Рис. 3.17. Индукционный датчик уровня металлической ванны на П-образном сердечнике

в центральном стержне нарушается и в измерительной обмотке  $W_3$  наводится э. д. с. При достижении границей раздела (шлак — металл) среднего стержня в измерительной обмотке  $W_3$  наводится максимальная э. д. с.

Второй тип датчика показан на рис. 3.17. Он состоит из 2 разомкнутых П-образных магнитопроводов 2 и 3, расположенных друг над другом, причем плоскости их пластин параллельны друг другу и по-

верхности жидкого металла. Каждый из П-образных магнитопроводов охвачен одной из измерительных обмоток 4 и 5, а оба магнитопровода (2 и 3) охвачены одной рабочей обмоткой 6.

Применение П-образных магнитопроводов позволяет увеличить проникновение электромагнитной энергии в металл шва, так как расстояние между торцами увеличивается по сравнению с Ш-образным магнитопроводом при сохранении одинаковых габаритов. Ток рабочей обмотки 6 создает в каждом магнитопроводе 2 и 3 магнитные потоки, равные по величине и одного направления. Это исключает шунтирование потоков каждым из магнитопроводов, а встречное включение измерительных обмоток обеспечивает на выходе датчика нулевой сигнал. При отсутствии электропроводной среды в зоне действия датчика магнитные потоки, создаваемые током рабочей обмотки 6, замыкающиеся по верхнему 2 и нижнему 3 магнитопроводам, равны э. д. с., индуцируемые в измерительных обмотках 4 и 5 также равны и сигнал на выходе датчика отсутствует. При подходе к нижнему магнитопроводу 3 электропроводной среды (расплавленный металл) в последней наводятся вихревые токи, искажающие магнитный поток, который замыкается по магнитопроводу 3. Равенство магнитных потоков нарушается, на выходе появляется сигнал, равный разности э. д. с., индуцируемый в измерительных обмотках 4 и 5.

Полученный сигнал с датчика подается на регулятор, который вырабатывает команды для управления приводом перемещения подвижного ползуна относительно шва.

В зависимости от режима ЭШС и интенсивности охлаждения между ползуном и швом образуется застывшая корочка шлака, толщина  $\delta_{ш}$  которой непостоянна в процессе сварки. В связи с этим расстояние между расплавленным металлом и датчиком изменяется, что приводит к смещению его выходной характеристики вдоль оси ординат (рис. 3.18).

Для регулирования уровня ванны при ЭШС может быть применен простейший двухпозиционный релейный регулятор, работающий на восходящей ветви статической характеристики датчика уровня (рис. 3.18).

Схема двухпозиционного регулятора уровня показана на рис. 3.19. Напряжение, снимаемое с генератора импульсов прямоугольной формы  $G$  частотой 6000 Гц, поступает на рабочие обмотки дат-

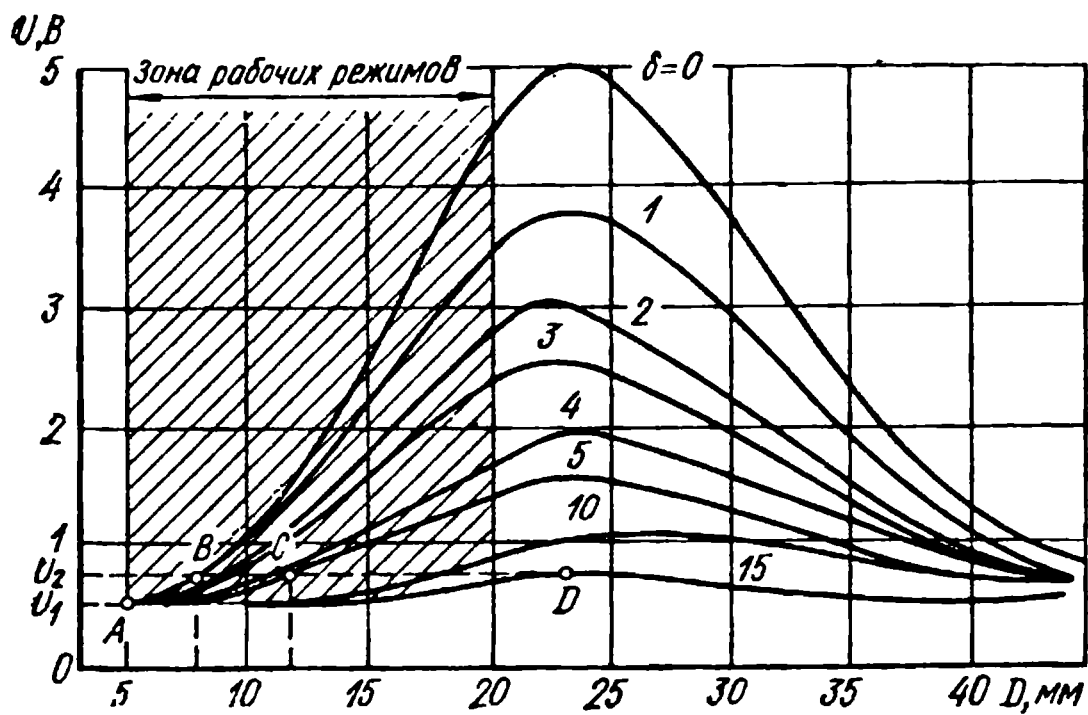


Рис. 3.18. Статические характеристики датчика уровня при различной толщине  $\delta$  гарнисажа ( $\delta=0-15$  мм)

чика уровня  $B$ . Выходной сигнал с  $B$ , пропорциональный уровню металлической ванны, подается на вход предварительного усилителя  $A1$ , нагрузкой которого служит детектор  $V$ . Выходное напряжение согласующего усилителя  $A2$ , пропорциональное уровню металлической ванны, поступает на вход двухпозиционного регулятора  $E$  и далее на исполнительный механизм  $ИМ$  — привод перемещения сварочного аппарата. Принципиальная схема двухпозиционного регулятора уровня жидкого металла рассмотрена в прил. 16.

Создание автоматического регулятора глубины шлаковой ванны при ЭШС с подвижными формирующими устройствами и регулятором уровня металлической ванны не представляет трудностей. Здесь простейшим будет устройство типа щупа, замыкающего цепь при соприкосновении с поверхностью шлаковой ванны.

В случае ограниченного доступа к шлаковой ванне, как, например, при сварке плавящимся мундштуком или пластинчатыми электродами, измерение глубины шлаковой ванны можно осуществить с помощью периодически погружаемого в ванну щупа. Этот щуп может быть плавящимся или неплавящимся. Первый импульс в схеме вырабатывается при соприкосновении конца щупа с верхней поверхностью шлаковой ванны, а второй — при его соприкосновении с поверхностью металлической ванны. Глубина шлаковой ванны будет определяться временем между этими двумя импульсами.

Системы автоматического регулирования уровня шлаковой ванны, построенные на принципе применения фотодатчиков, более сложные

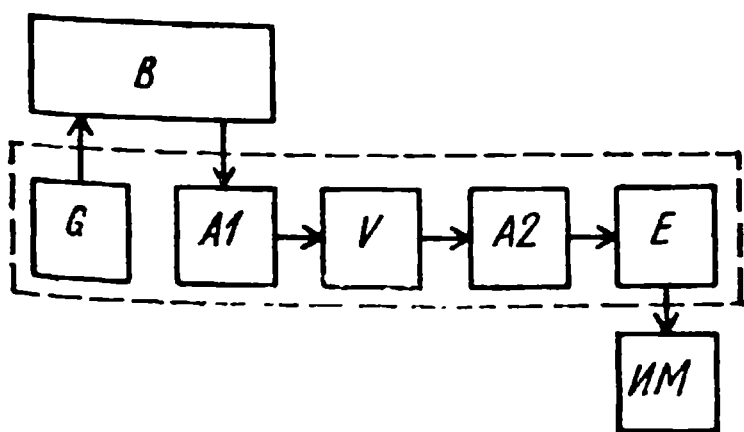


Рис. 3.19. Функциональная схема САР уровня жидкого металла

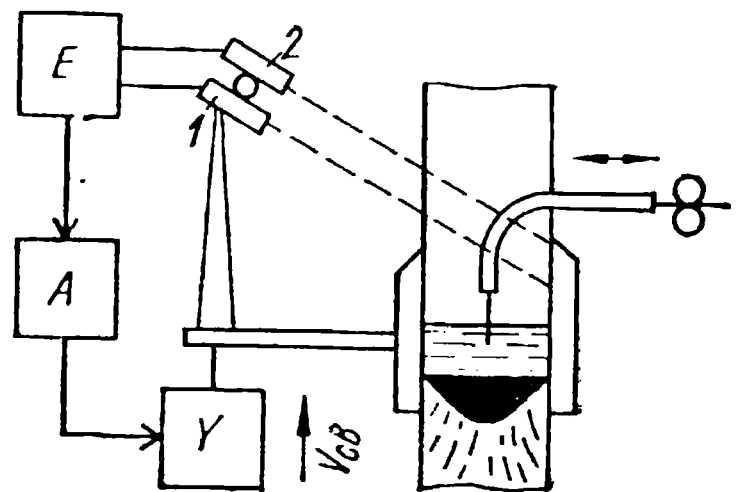


Рис. 3.20. Схема САР уровня шлаковой ванны с применением фотодатчиков

по сравнению с контактными, однако обладают большей надежностью в работе, так как отсутствует непосредственный контакт со свариваемым изделием. Разработана схема устройства, содержащего два фотодатчика, направленных на зону сварки и воспринимающих свечение шлаковой ванны и газа над ней (рис. 3.20). Фотодатчик 2 применяется для повышения точности регулирования. Он включен встречно по отношению к датчику 1 и воспринимает только свечение газа над ванной, что исключает помехи от свечения газа за счет вычитания сигналов второго датчика из первого. Оба датчика шарнирно соединены между собой, установлены в водоохлаждаемые тубусы и снабжены инфракрасными светофильтрами. Суммарный сигнал с датчиков, выделяемый устройством  $E$ , после усиления и преобразования устройством  $A$  поступает на схему управления  $Y$  привода перемещения ползунов.

### 3.4. Регулирование режима электрошлаковой сварки в функции сварочного зазора

Зазор в стыке соединяемых ЭШС деталей на уровне металлической ванны является величиной переменной и зависит от деформационных перемещений кромок деталей, определяемых местным нагревом в процессе сварки и усадкой кристаллизирующейся части шва. Технологические меры компенсации перемещения кромок (сборка стыка с клиновидным зазором, имеющим большую величину вверху) эффективны лишь при длине шва до 1,5 м. При большей длине шва (до 5—6 м) обычно устанавливают равномерный зазор, который в процессе сварки изменяется. В некоторых случаях направление перемещения кромок при окончании первой половины шва изменяется на обратное, что сопровождается закрытием зазора или его раскрытием при окончании сварки [51]. В результате отклонение фактического сварочного зазора на уровне шлаковой ванны достигает 20 % и более.

Скорость сварки, т. е. скорость заполнения сварочного стыка металлом, определяется согласно зависимости (3.1) равенством объемов металла в единицу времени, подаваемого в шлаковую ванну  $F_э V_п$  и заполняющего объем стыка  $F_м V_{св}$ . С учетом усиления шва  $A$ , формируемого канавками ползунов, скорость сварки при использовании проволочных электродов и постоянной толщине  $B$  свариваемых деталей можно выразить в виде

$$V_{св} = \frac{F_э}{B + 2A} \frac{V_п}{\delta}, \quad (3.2)$$

где  $F_э$  — площадь сечения электрода;  $V_п$  — скорость подачи электрода;  $\delta$  — сварочный зазор.

Как видно из уравнения (3.2), скорость сварки обратно пропорциональна зазору и ее относительное отклонение может быть больше отклонений последнего. Так, при расширении зазора на 20% необходимо снизить  $V_{св}$  на 16,6 %, а при сужении зазора на 20 % необходимо увеличить  $V_{св}$  на 25 %. Расширение зазора при сварке, проводимой без коррекции подачи электрода, может привести к появлению непроваров, а сужение зазора может снизить стойкость металла против образования кристаллизационных трещин. Для поддержания

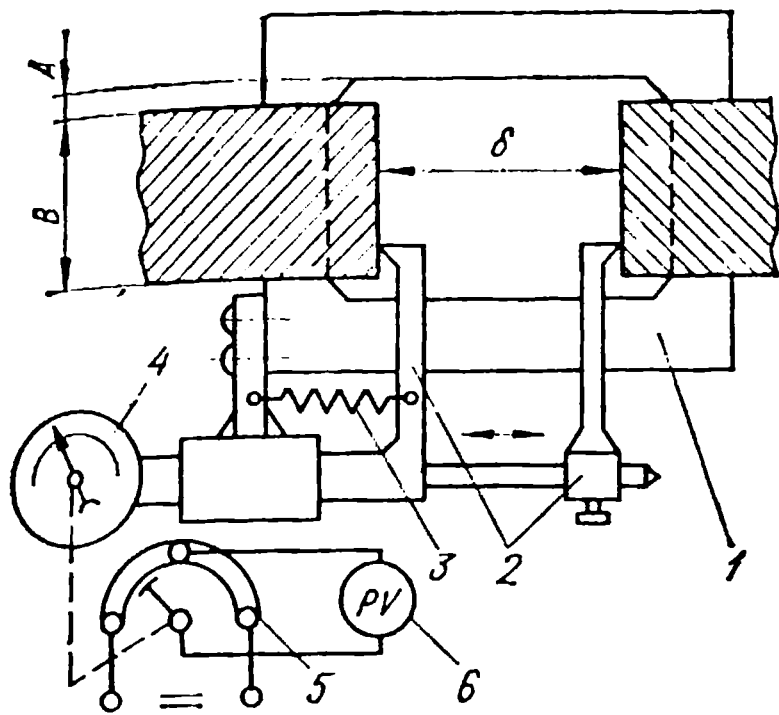


Рис. 3.21. Потенциометрический датчик сварочного зазора:

1 — ползуны; 2 — щупы; 3 — пружина; 4 — индикатор; 5 — потенциометр типа ПТП-5; 6 — вольтметр со шкалой «миллиметры зазора»

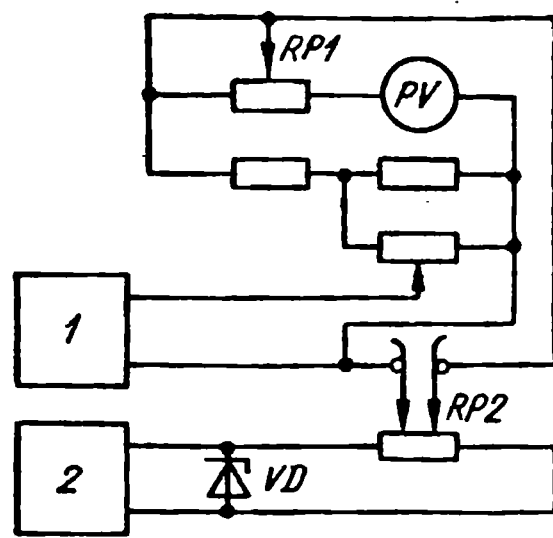


Рис. 3.22. Принципиальная электрическая схема измерителя сварочного зазора

постоянной скорости сварки при изменяющемся сварочном зазоре достаточно выразить величину изменения зазора в процентах и соответственно корректировать скорость подачи электрода. Поскольку изменение сварочного зазора происходит медленно, периодический его замер через 20—30 мин с коррекцией подачи проволоки не вызывает затруднений.

В научно-производственном объединении ЦНИИТмаш для контроля зазора и ручного регулирования скорости сварки разработан измеритель зазора с потенциометрическим датчиком (рис. 3.21), установленным на подвеске или консоли автомата выше мундштуков с электродами [51]. Измеритель (рис. 3.22) состоит из типового блока питания ВНП-12/25 (2), потенциометрического датчика зазора  $RP2$ , вольтметра  $PV$  и самописца 1. Напряжение питания потенциометра  $RP2$  датчика стабилизировано стабилитроном  $VD$  с опорным напряжением 7,5—8 В. Падение напряжения, снимаемое с движков потенциометра  $RP2$ , определяется расстоянием между щупами, скользящими в процессе сварки по кромкам стыка. Шкала вольтметра  $PV$  проградуирована в «миллиметрах зазора». Резистором  $RP1$  проводят тарировку схемы. Погрешность измерителя зазора не превышает  $\pm 0,5$  мм.

Использование измерителя зазора позволяет осуществить ручное регулирование  $V_{св}$ , поскольку потребность в коррекции скорости  $V_{п}$  возникает в среднем не чаще одного раза в 30 мин. Установлено, что одной коррекции  $V_{св}$  при изменяющемся зазоре  $\delta$  недостаточно для стабилизации провара кромок, формы металлической ванны и условий кристаллизации металла шва, определяющих его качество. Одновременное регулирование скорости  $V_{п}$  (или сварочного тока) и напряжения сварки в зависимости от зазора обеспечивает стабильность характеристик при больших длинах шва и значительных изменениях зазора в процессе сварки.

Примером регулирования режима ЭШС в функции зазора может служить автоматическая система (рис. 3.23). Она образована объеди-

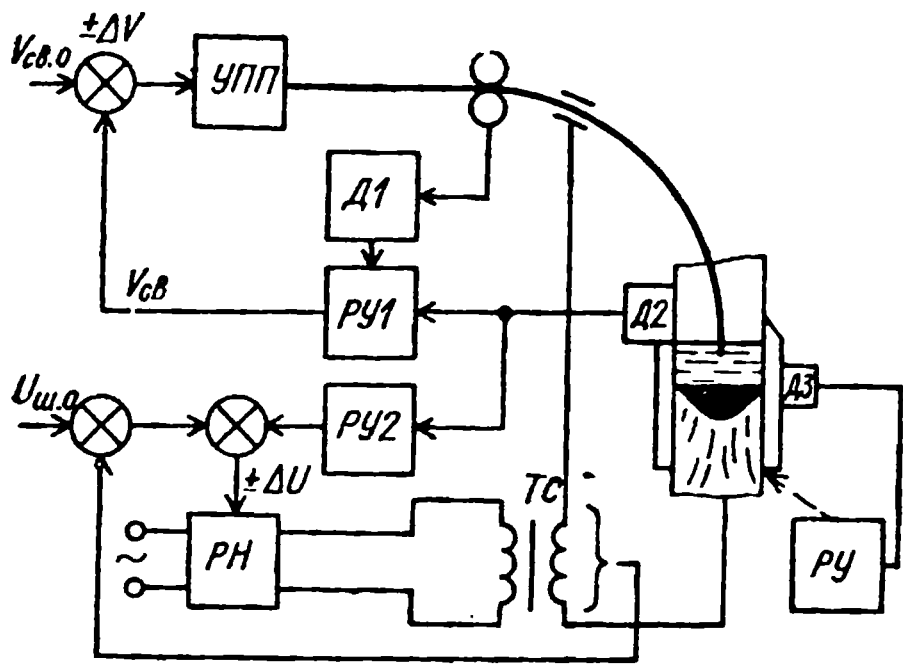


Рис. 3.23. САУ процессом ЭШС в функции сварочного зазора:

$T$  — трансформатор сварочный;  $РУ1$ ,  $РУ2$  — устройства коррекции скорости и напряжения;  $Д1$ ,  $Д2$  — датчики скорости и зазора соответственно;  $Д3$  — датчик уровня жидкого металла;  $РУ$  — регулятор уровня

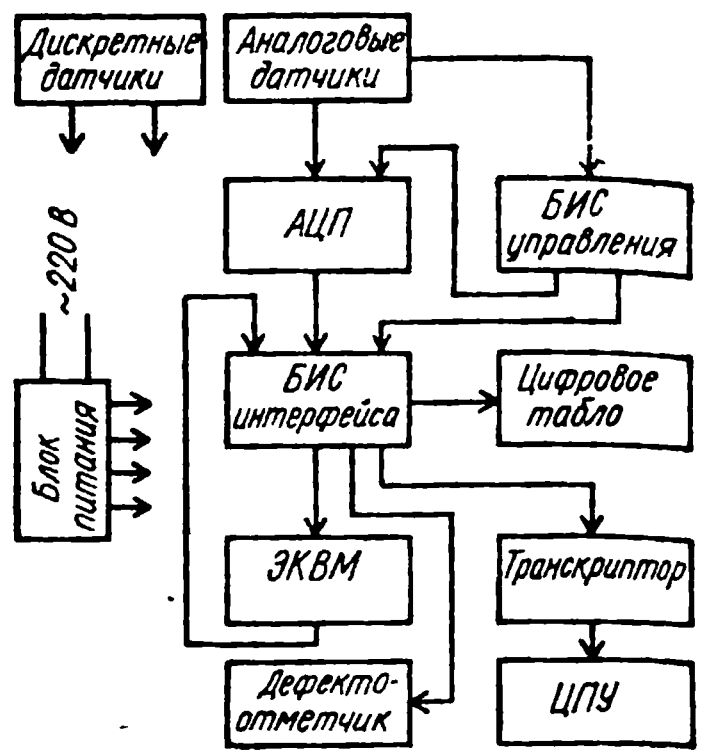


Рис. 3.24. Структура ИИС типа СУ-150

нением регулятора скорости подачи проволоки в функции сварочного зазора с воздействием на управляемый привод подачи УПП электрода и регулятора напряжения РН источника питания ТС с коррекцией выходного напряжения ТС также в функции сварочного зазора.

При этом сварочный аппарат перемещается вдоль сварного шва с помощью датчика и регулятора уровня жидкого металла в сварочном зазоре.

В алгоритм работы системы заложен принцип пропорционального увеличения скорости подачи электрода (тока сварки) при увеличении сварочного зазора с одновременным снижением напряжения сварки путем регулирования э. д. с. источника питания, причем величина регулирующего воздействия по этому параметру зависит от номинального напряжения сварки [51]. Такой подход к созданию САУ процесса ЭШС может обеспечить постоянство скорости сварки, величины проплавления и коэффициента формы шва, определяющего условия кристаллизации и склонность металла шва к образованию трещин.

### 3.5. Информационно-измерительные системы параметров процесса электрошлаковой сварки

Для того чтобы решить задачи, стоящие перед сварочной наукой и техникой, по повышению качества сварных соединений, обеспечению их заданной эксплуатационной надежности, росту производительности труда, необходимо создать автоматизированные системы управления (АСУ) технологическими процессами (ТП) сварки на основе применения электронно-вычислительной техники.

На первом этапе создания АСУ ТП ЭШС наиболее целесообразно использовать локальные информационно-измерительные системы (ИИС) нижнего уровня для каждой из сварочных установок, способных обрабатывать полученные данные, чтобы информировать оператора и регистрировать результаты на цифropечатающем устройстве



в реальном масштабе времени, а также анализировать и поддерживать качество сварного соединения по заданным и реальным параметрам (режим прямого цифрового управления).

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработана локальная ИИС типа СУ-150 на интегральных микросхемах серии 145 для контроля параметров процессов электрошлаковой сварки и наплавки, работающая в комплексе с серийными измерительными преобразователями типов Е824, Е825, Е846, электроуправляемой печатающей машинкой ЭУМ-23 и дефектоотметчиком типа НК110. ИИС выполняет следующие функции: автоматически вводит информацию от датчиков параметров процесса ЭШС; программирует количество опрашиваемых датчиков от 1 до 7; автоматически коммутирует опрашиваемые датчики; вводит информацию в синхронном и асинхронном режиме; осуществляет допусковый контроль вводимой информации по заданным в памяти допусковым величинам и индицирует отклонение контролируемых параметров процесса от допусковых величин с выводом на цифropечать; обрабатывает поступающую информацию по запрограммированной математической модели для прогнозирования состояния исследуемого процесса: отмечает место на изделии, где произошли отклонения режима с помощью дефектоотметчика.

Структура ИИС СУ-150 приведена на рис. 3.24. Систему подготавливают к работе в следующем порядке:

1. Заносят в память ЭКВМ программу необходимых вычислений;
2. С помощью клавиатуры ЭКВМ набирают число, соответствующее условному коду программы сварки;
3. Заносят в память ЭКВМ допусковые величины для контроля входной информации (нижние и верхние уровни);
4. Заносят код цифropечати.

После выполнения указанных операций система готова к работе.

По нажатию клавиши «пуск» система переводится в режим измерения. Интерфейс, расположенный на плате ЭКВМ, принимает из регистра памяти ЭКВМ данные о процессе сварки и выдает код, соответствующий номеру опрашиваемого канала. Входная аналоговая информация поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), с выхода которого результат измерения в виде 12-разрядного двоично-десятичного кода вводится в интерфейс, где может быть проанализирована на нижний и верхний допуск, введенный в память ЭКВМ вместе с входной информацией. Выход информации за пределы допусков будет индицироваться соответствующими разрядами индикатора отклонений, при этом интерфейс выдает команду в схему управления работой дефектоотметчика.

Входы интерфейса подключаются также через схему совпадений к первичным преобразователям, выдающим информацию в двоично-десятичном коде и размещенным на плате управления. Эти первичные преобразователи представляют собой цифровые часы и счетчик номера канала дополнительного коммутатора. Затем информация вводится в ЭКВМ для вычисления по алгоритму, хранящемуся в программной части памяти. При появлении признака готовности задачи интерфейс принимает из ЭКВМ через регистр памяти результат вычисления и выдает его на транскриптор, который выводит содержимое операций.



ных регистров на цифровое печатающее (регистрирующее) устройство (ЦПУ) — электроуправляемую машинку ЭУМ-23. Результат обработки индицируется на цифровом табло. Управляющим сигналом для запуска транскриптора является код номера устройства, заданный в программе выполнения процесса сварки. Выдав сигнал пуска, интерфейс анализирует готовность транскриптора и при подтверждении готовности выдает результат обработки входной информации. Информация хранится на выходных шинах до снятия сигнала готовности. Окончив выдачу результатов, система переходит в режим ожидания сигнала «пуск».

При длительном времени протекания процесса система выдает избыточную информацию при непрерывной печати на ЦПУ, что затрудняет технологам дальнейшую обработку результатов измерений. В связи с этим внутренние связи системы организованы таким образом, чтобы выдача информации на печать происходила только при выходе за пределы допусков контролируемых параметров (нарушениях режима) или по вызову оператора в любой текущий момент времени. Применение ИИС на уникальных установках ЭШС для сварки крупногабаритных изделий штамповой оснастки плавящимися мундштуками со многими электродными проволоками по трехфазной схеме с дублированием, которые подаются несколькими приводами подачи, потребовало существенного расширения функциональных возможностей системы по числу контролируемых параметров. Для этого в схему ИИС введены дополнительные коммутаторы, позволившие производить одновременный контроль до 30 параметров процесса. Для контроля длительных процессов ЭШС и наплавки (24—50 ч) при нормальном их протекании (без нарушений пределов допусков) работа системы организована таким образом, чтобы вывод на ЦПУ всех измеряемых параметров процесса в реальном масштабе времени проводился автоматически, без участия оператора, через определенный интервал времени (10, 20, 30 мин), выбираемый заранее по решению технолога.

На рис. 3.25 приведена структурная схема трехфазной трехэлектродной установки для ЭШС кольцевых швов, оборудованной ИИС СУ-150 для контроля 7 основных параметров процесса ЭШС — тока  $I_1 \div I_3$ , напряжения  $U_1 \div U_3$  каждого электрода и э. д. с.  $e_{тг}$  тахогенератора.

Опыт промышленного применения локальных ИИС для контроля важнейших параметров процесса ЭШС показал, что они позволяют создать основу для статистического анализа процесса сварки, повысить технологическую дисциплину и культуру производства, автоматизировать контроль за процессом и документирование его параметров для ОТК.

### **3.6. Современные способы и устройства для управления процессом электрошлаковой сварки**

Управление процессом ЭШС плавящимся мундштуком по частоте естественной модуляции сварочного тока. При ЭШС плавящимся мундштуком крупногабаритных изделий в установках с неподвижными относительно сварочного зазора формирующими сварочный шов наклад-

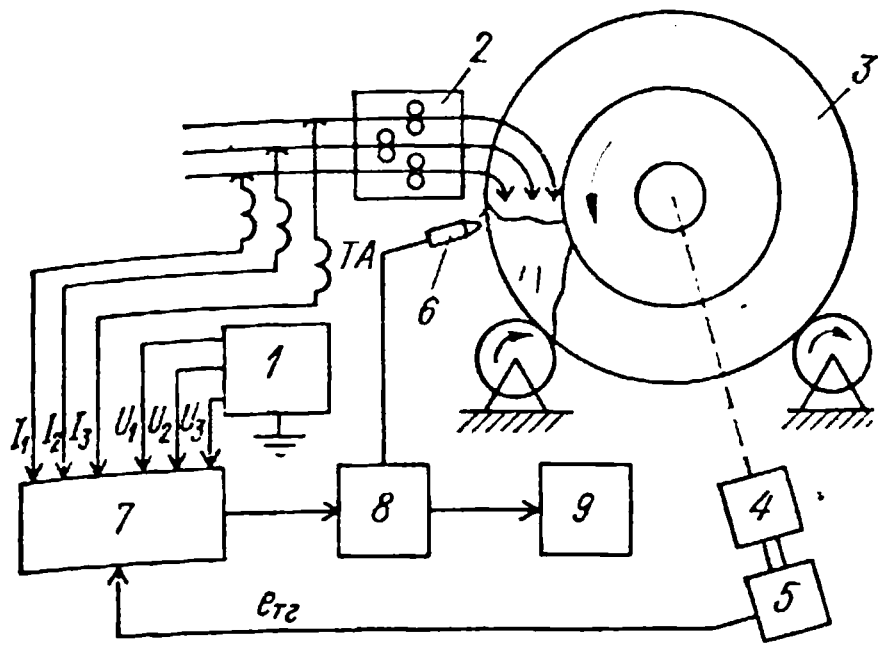


Рис. 3.25. Функциональная схема трехфазной установки для ЭШС, оборудованной ИИС СУ-150:

1 — сварочный трансформатор; 2 — сварочный аппарат; 3 — изделие; 4 — привод вращения изделия; 5 — тахогенератор; 6 — дефектосотметчик; 7 — измерительные преобразователи; 8 — ИИС СУ-150; 9 — ЦПУ

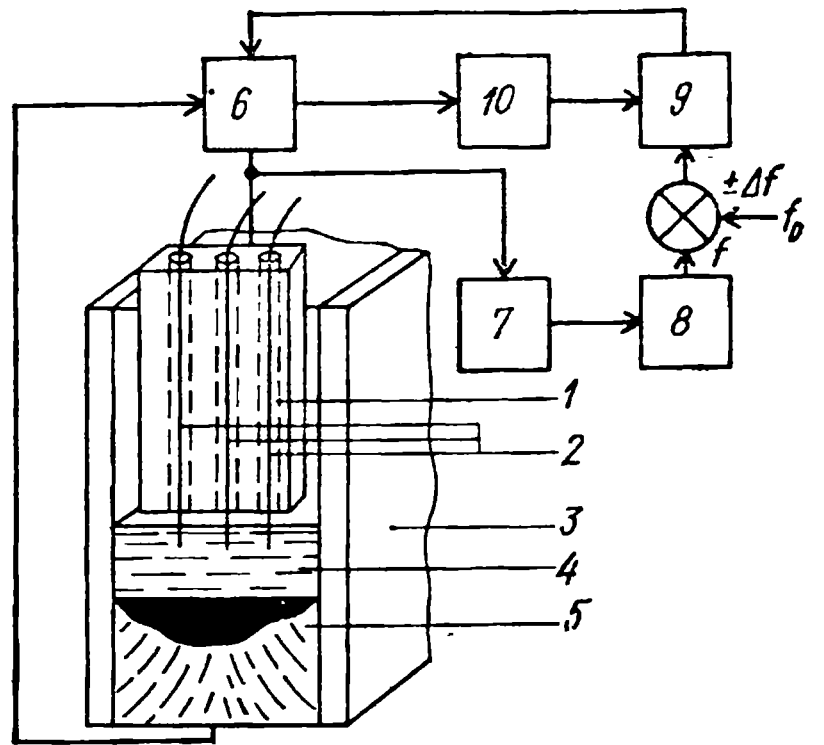


Рис. 3.26. Система регулирования линейной скорости наплавления шва по частоте естественной модуляции сварочного тока

ками затруднено регулирование режима сварки, так как нет достоверной информации о реальной скорости сварки.

Линейная скорость наплавления сварного шва значительно изменяется от начала до конца сварки вследствие аккумуляции свариваемым изделием тепловой энергии, изменения глубины и объема шлаковой ванны из-за образования гарнисажа, проливов шлака, значительных колебаний напряжения питающей сети и т. д. Изменение линейной скорости наплавления сварного шва вследствие указанных причин приводит к изменению ширины провара и, как следствие, к появлению брака и снижению технико-экономических показателей процесса ЭШС.

В процессе сварки плавящийся мундштук при касании его торца с поверхностью шлаковой ванны плавится со скоростью, превышающей скорость сварки, и через некоторое время отрывается от шлаковой ванны. В течение нескольких секунд, пока шлаковая ванна снова поднимается на величину полученного при отрыве зазора, ток определяется только подачей электродных проволок. Во время плавления мундштука ток повышается на 20—30 % (а в случае сварки крупногабаритных изделий — до 60 ÷ 100 %). Этот процесс повторяется периодически в течение всей сварки, т. е. амплитуда сварочного тока естественно модулируется с определенной частотой. При этом линейная скорость наплавления сварного шва прямо пропорциональна частоте естественной модуляции амплитуды сварочного тока. Эта частота может быть принята в качестве измеряемого электрического параметра, используемого для выработки сигнала рассогласования, коррекции в соответствии с этим сигналом напряжения источника питания и регулирования тем самым скорости наплавления сварного шва.

Устройство для осуществления способа управления процессом ЭШС плавящимся мундштуком (рис. 3.26) работает следующим образом: после наведения шлаковой ванны 4 начинают плавиться током от

источника питания 6 электродные проволоки 2 и плавящийся мундштук 1, образуется сварной шов 5 между формирующими накладками 3 и свариваемыми частями изделия. При этом электродные проволоки подают в шлаковую ванну с постоянной скоростью. Измеритель частоты модуляции амплитуды сварочного тока 8 получает информацию от датчика тока 7 и преобразует ее в постоянное напряжение, пропорциональное частоте  $f$  модуляции амплитуды тока. После сравнения измеренного и заданного напряжений, пропорциональных частоте модуляции, разность их поступает в блок коррекции напряжения 9 источника питания 6, который формирует в соответствии со знаком рассогласования частот модуляции команду на снижение либо повышение ступени напряжения источника питания 6. После коррекции напряжения источника питания 6 реле времени технологического интервала 10 закрывает выход блока коррекции 9 на время, определяемое постоянной времени шлакометаллического расплава до полного окончания переходного процесса в шлаковой ванне. Это время определяется опытным путем для различных сечений изделий и плавящихся мундштуков. После окончания переходного процесса реле времени 10 открывает выход блока 9 для поступающего сигнала коррекции в случае появления на его входе сигнала рассогласования  $\Delta f$ .

Рассмотренный способ управления позволяет обеспечить заданную частоту модуляции амплитуды сварочного тока (т. е. заданную оптимальную линейную скорость наплавления сварного шва при сохранении его ширины), устранить перечисленные возмущения, влияющие непосредственно на качество процесса ЭШС, снизить брак, повысить технико-экономическую эффективность ЭШС плавящимся мундштуком.

**Управление процессом ЭШС плавящимся мундштуком с принудительным изменением сварочного тока.** Естественная модуляция амплитуды тока при ЭШС плавящимся мундштуком крупногабаритных изделий может быть причиной резких колебаний мощности, вводимой в шлаковую ванну, температурной нестабильности в плавильной зоне, и, как следствие, периодической неравномерности ширины провара, ухудшения качества сварного шва. Для предупреждения этих нежелательных явлений можно использовать периодическое изменение скорости подачи электродных проволок через плавящийся мундштук в шлаковую ванну.

Особенность этого способа управления процессом ЭШС — изменение скорости  $V_n$  подачи всех электродных проволок в шлаковую ванну с частотой, равной частоте естественной модуляции амплитуды сварочного тока. При этом скорость  $V_n$  увеличивают, уменьшая амплитуду тока, или уменьшают, увеличивая амплитуду тока с приведением сигнала рассогласования между опорной и реальной активными мощностями, выделяемыми в шлаковой ванне, к нулю. Функциональная схема системы управления процессом ЭШС с использованием регулятора скорости  $V_n$  показана на рис. 3.27.

После наведения шлаковой ванны 3 через каналы плавящегося мундштука 1 подаются в шлаковую ванну электродные проволоки 2 посредством привода 6 от усилителя-преобразователя 8 с постоянной начальной скоростью  $V_{нач}$ . Электродные проволоки 2 под воздей-

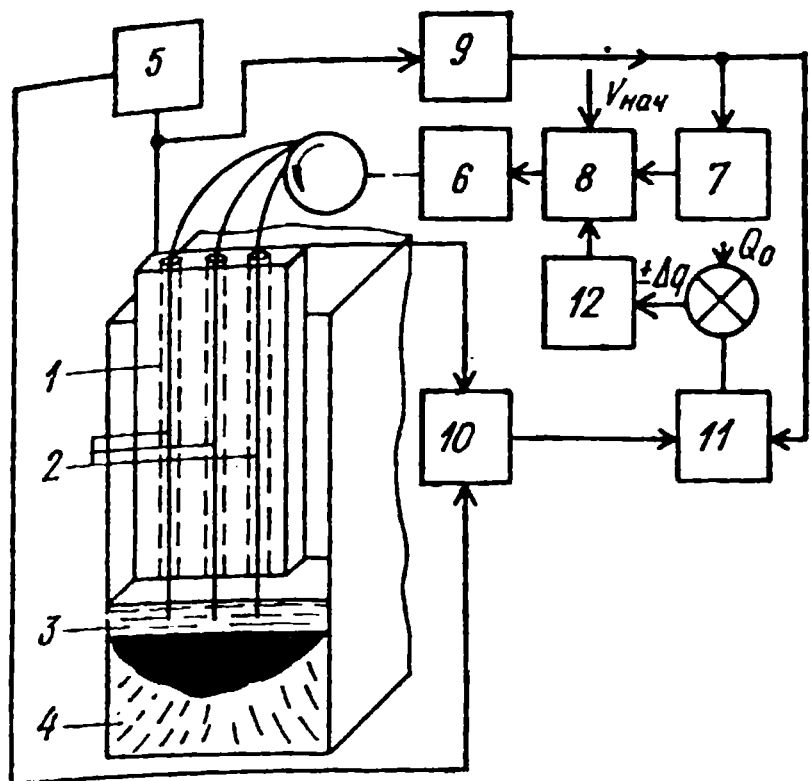


Рис. 3.27. Система регулирования процесса ЭШС при модуляции скорости подачи проволоки

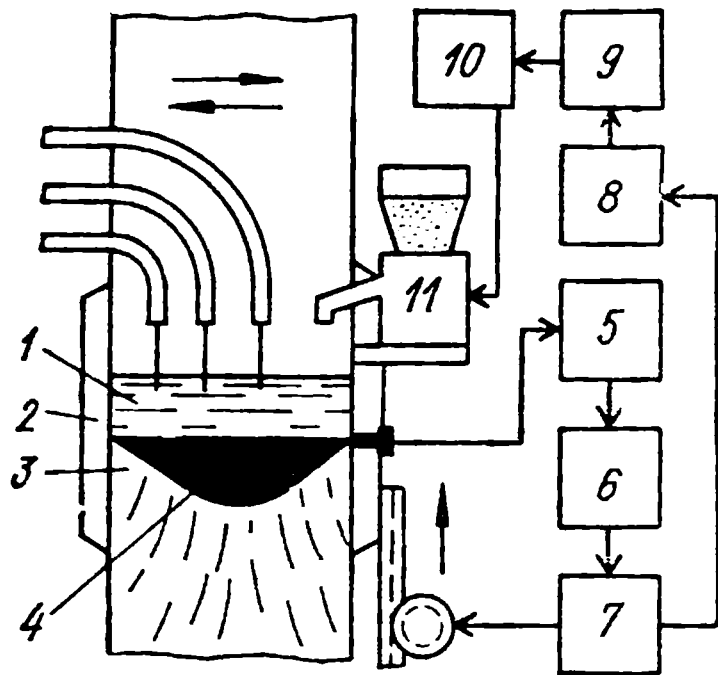


Рис. 3.28. Система управления дозированием присадочных материалов при ЭШС

ствием тока от источника питания 5 начинают плавиться в шлаковой ванне 3, образуя сварной шов 4. Преобразователь тока 9 через блок коэффициента пропорциональности 7 и усилитель-преобразователь 8 воздействует на привод подачи проволоки 6, принудительно изменяя скорость подачи проволоки с частотой амплитудной модуляции тока. Измеритель активной мощности 11 получает информацию от преобразователей тока 9 и напряжения 10 на шлаковой ванне. Сигнал с выхода блока 11, пропорциональный реальной активной мощности, сравнивается в узле сравнения с опорным сигналом, пропорциональным оптимальной мощности. Разность этих сигналов  $\pm \Delta q$  через блок коррекции 12 воздействует с соответствующим знаком на установку начальной скорости  $V_{нач}$  в блоке усилителя-преобразователя 8, сводя разность между опорной и реальной активной мощностью, выделяемой в шлаковой ванне, к нулю. Особенностью этого способа регулирования является отказ от дополнительных механизмов подачи вспомогательных проволоки, что позволяет упростить оборудование, исключить опасность сваривания концов электродных проволоки с торцом плавящегося мундштука (так как электродные проволоки подаются в шлаковую ванну непрерывно, без остановок), обеспечить равномерность ширины сварного шва, повысить качество сварного соединения и эффективность процесса ЭШС.

Управление дозированием флюса и раскислителей при ЭШС протяженных швов. При сварке протяженных линейных или кольцевых швов ( $t_{св} = 20 \div 26$  ч) значительная часть шлака уходит в гарнисаж. Кроме того, происходит избирательная кристаллизация, испарение некоторых компонентов шлака, в результате чего изменяется химический состав шлака и металла шва.

Для того чтобы обеспечить равномерность химического состава шлаковой ванны и постоянство ее объема, применяют способы и устройства для дозирования присадочных материалов (шлака и раскислителей). При этом заранее рассчитывают необходимое на весь шов количество присадочных материалов (на основании известных коэф-

фициентов растворения металлом данной марки различных элементов) и через дозаторы подают их на зеркало шлаковой ванны по времени (непрерывно или импульсно) мелкими дозами.

При ЭШС крупнотоннажных изделий процесс сварки состоит как минимум из трех стадий: 1) старта и теплового разгона, когда от момента начала сварки скорость наплавления сварного шва в течение достаточно длительного периода изменяется от нуля до заданной в программе сварки; 2) периода квазистационарного режима, когда скорость наплавления сварного шва сохраняется приблизительно на одном уровне; 3) периода выведения усадочной раковины, когда скорость наплавления сварного шва уменьшается от заданной в программе сварки до нуля. На скорость наплавления сварного шва влияют также колебания напряжения питающей сети, которые в некоторых случаях приводят к значительным ее отклонениям от заданного значения.

Поэтому при обычном дозировании присадочных материалов (без обратной связи) по реальной скорости наплавления сварного шва постоянным количеством дозируемых присадочных материалов в разные моменты сварки обрабатывается различный объем жидкого металла в сварочном зазоре (объем металлической ванны существенно зависит от скорости наплавления сварного шва).

Это снижает степень рафинирования металла и шлака, приводит к неравномерности химического состава сварного шва по его высоте и сечению.

Для управления дозированием присадочных материалов целесообразно использовать системы с обратной связью по реальной скорости наплавления сварного шва, т. е. в любой момент сварки скорость подачи присадочных материалов на зеркало шлаковой ванны должна соответствовать реальной скорости наплавления сварного шва независимо от внешних возмущений (колебания  $\dot{y}_c$ , разделки кромок и т. п.). Это позволяет конкретные объемы жидких металла и шлака обрабатывать соответствующими только им количествами присадочных материалов, что обеспечивает равномерность химического состава сварного шва по высоте и сечению, повышает качество сварного соединения.

Пример системы управления дозированием присадочных материалов при ЭШС показан на рис. 3.28. После наведения шлаковой ванны 1 в сварочном зазоре между ползунами (накладками) 2 начинает плавиться электродная проволока и образуется сварной шов 3. При достижении зеркалом металлической ванны 4 датчика уровня 5 последний через привод перемещения формирующей накладке 6 и редуктор 7 начинает перемещать ползуны 2 в зависимости от уровня металлической ванны 4. Блок измерения скорости перемещения накладке 8 получает через редуктор 7 информацию о реальной скорости перемещения ползунов 2 по уровню металла 4 и через блок коэффициента пропорциональности 9 воздействует на блок задания скорости дозациии 10. Блок 10 посредством дозатора 11 подает присадочные материалы в шлаковую ванну со скоростью, пропорциональной реальной скорости наплавления сварного шва в любой момент времени плавки.

Рассмотренный способ управления дозированием присадочных материалов можно применять при ЭШС с неподвижными относительно сварного шва формирующими накладками. Для этого необходимо связать скорость дозирования присадочных материалов со скоростью перемещения электродной проволоки, если она подается регулятором тока или сопротивления. Однако точность определения скорости наплавления сварного шва по скорости подачи электродной проволоки значительно меньше, чем по уровню жидкого металла, и поэтому использование способа управления менее эффективно.



## 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

### 4.1. Характеристики объекта управления

Процесс образования сварного шва как объект автоматического управления при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) характеризуется выходными переменными  $\bar{y}$  (показатели качества процесса сварки и шва), входными регулирующими  $\bar{x}$  (параметры режима сварки) и возмущающими  $\tilde{z}$  воздействиями (рис. 4.1).

Для контроля качества ЭЛС используют прямые показатели качества — геометрические размеры и сплошность сварного шва, его расположение относительно поверхности сопряжения свариваемых деталей. Вариации параметров режима сварки наиболее четко отражаются в изменении геометрических размеров шва. Кроме того, механические характеристики шва и вероятность появления в нем дефектов находятся в определенной связи с формой поперечного сечения шва. Поэтому при оценке качества швов прежде всего определяются глубина ( $H$ ) и ширина ( $B$ ) их проплавления.

Для того чтобы контролировать и автоматически регулировать качество сварки, используют параметры различных физических процессов, сопровождающихся ЭЛС: ток эмиссии из области сварки  $I_e$ , ионный ток из области сварки  $I_i$ , ток через свариваемую деталь  $I_{дет}$ , тепловое излучение из области сварки  $E$ , сквозной ток через свариваемую деталь  $I_{скв}$  и др.

К управляющим воздействиям  $\bar{x}$  относятся:  $U_l$  — ускоряющее напряжение;  $I_l$  — ток электронного луча;  $\alpha_{сх}$  — угол сходимости луча, который регулируется изменением тока фокусирующей катушки  $I_f$ ;  $h_f$  — расстояние от поверхности свариваемой детали до наименьшего сечения луча;  $r_l$  — радиус электронного луча;  $V_{св}$  — скорость сварки. Наибольшее влияние на качество сварки оказывают  $I_f$ ,  $r_l$ ,  $\alpha_{сх}$  и  $h_f$ . Режим сварки задается величинами  $I_l$  и  $V_{св}$ . Во многих сварочных установках имеется возможность также регулировать ускоряющее напряжение  $U_l$ , однако, как правило, устанавливают максимально возможную величину  $U_l$ .

К возмущающим воздействиям на ЭЛС  $\tilde{z}$  можно отнести:  $\Delta y$  — смещение оси электронного луча относительно свариваемого стыка;  $\varphi$  — угол наклона электронного луча к поверхности сопряжения свариваемых деталей;  $T_{дет}$  — температуру свариваемых деталей;  $\delta_z$  — ширину зазора между свариваемыми деталями.

Цель автоматического управления процесса ЭЛС — обеспечение экстремума обобщенного показателя эффективности  $S(\bar{y}, \bar{x}, \tilde{z})$ . Для этого необходимо иметь возможность измерять вектор состояния объекта  $\bar{y}$ , векторы управления  $\bar{x}$  и возмущений  $\tilde{z}$  и знать вид функционала  $S(\bar{y}, \bar{x}, \tilde{z})$ . В настоящее время практически решена лишь частная проблема процесса управления ЭЛС — автоматическое

регулирование ЭЛС, предусматривающее вместо отыскания экстремума обобщенного показателя эффективности стабилизацию или программное изменение отдельных составляющих вектора выходных переменных  $y_1, y_2 \dots y_m$  — показателей качества ЭЛС в условиях действия возмущений  $\bar{z}$ .

Для управления процессом ЭЛС необходимо иметь его математическую модель, связывающую выходные переменные  $\bar{y}$  с регулирующими  $\bar{x}$  и возмущающими  $\bar{z}$  воздействиями. Наиболее известны модели, где в качестве выходной переменной принята глубина проплавления  $H$ . Эти модели, полученные на основании обработки экспериментальных данных, представляют в виде полинома

$$H = a_0 + a_1 U_{л} + a_2 I_{л} + a_3 V_{св} + \dots \quad (4.1)$$

либо в виде

$$H = \alpha_0 \frac{U_{л}^{\alpha_1} I_{л}^{\alpha_2}}{V_{св}^{\alpha_3} r_{л}^{\alpha_n}}, \quad (4.2)$$

где  $a_0 \dots a_n, \alpha_0 \dots \alpha_n$  — постоянные коэффициенты, зависящие от свариваемого материала и сварочной установки. Аналогичные модели получены и для других выходных переменных шва — усиления, ширины шва на разной глубине, формы шва и т. д. Эти модели наиболее точные, но их нельзя применять для иных материалов и вне диапазона варьирования параметров режима сварки, для которого проведены эксперименты. Кроме того, как всякие аппроксимационные формулы, они лишены физического смысла.

Большее физическое содержание несут модели, полученные аналитическим путем на основе метода интегрального теплового баланса. Полагая ширину сварного шва неизменной и не зависящей от режима и материала, уравнение теплового баланса записываем в виде

$$Q_0 = \sum_{i=1}^4 Q_i, \quad (4.3)$$

где  $Q_0 = U_{л} I_{л}$  — мощность электронного луча;  $Q_i$  — составляющие теплового потока, расходуемые на скрытую теплоту плавления, испарения, на излучение и теплопроводность.

После преобразований уравнения (4.3) с учетом выражений для всех составляющих потока  $Q_i$  получаем формулу для глубины проплавления

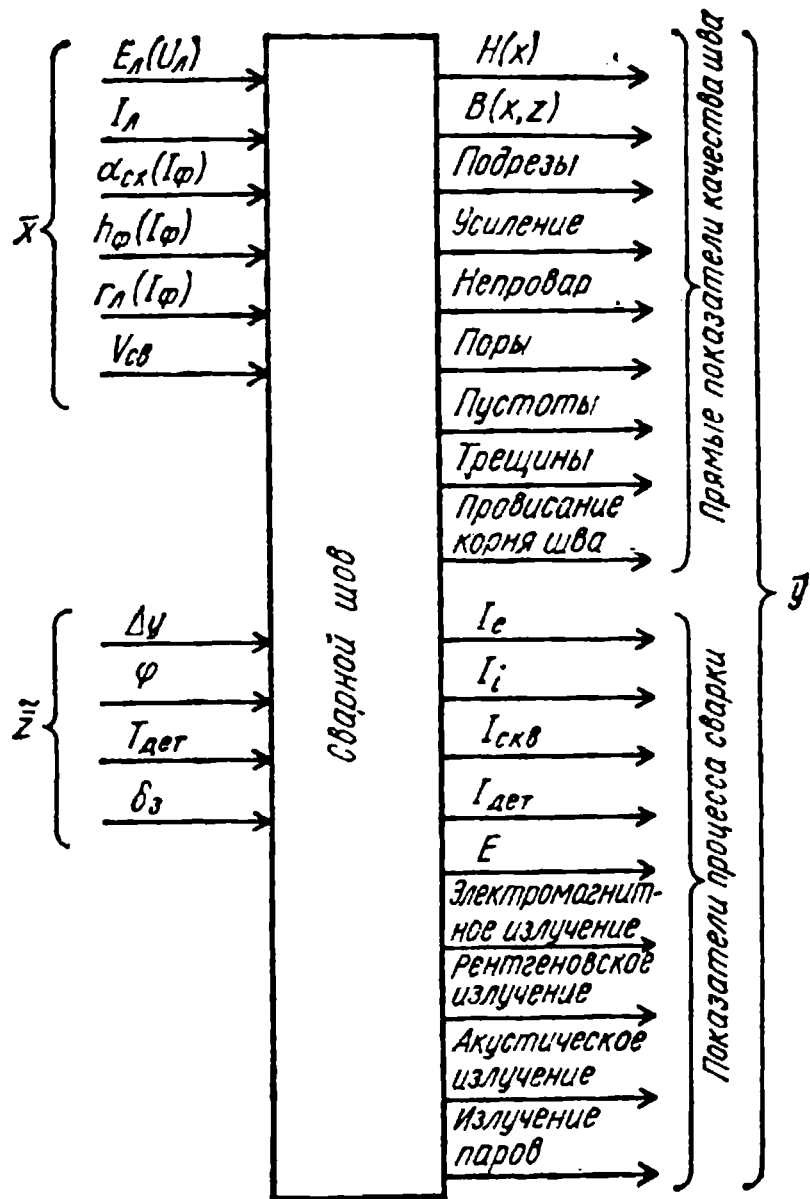


Рис. 4.1. Сварной шов при ЭЛС как объект регулирования

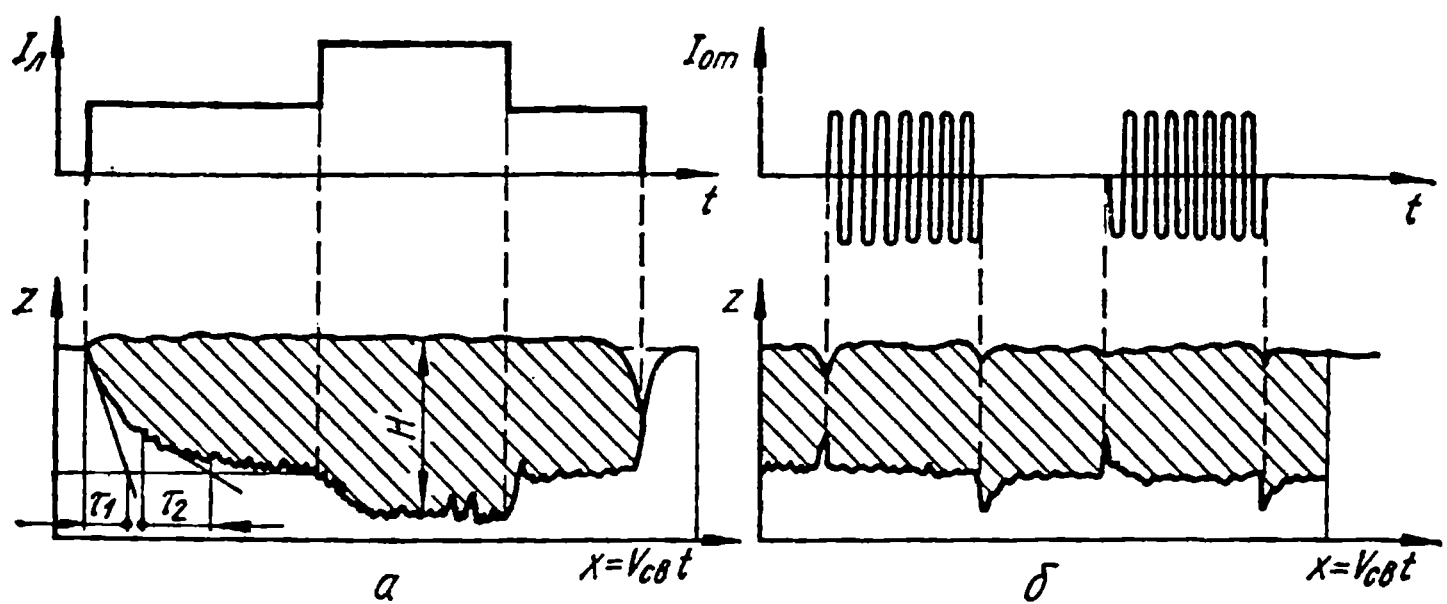


Рис. 4.2. Динамика изменения глубины проплавления при ступенчатом изменении параметров режима сварки:

а — тока луча; б — тока отклоняющей катушки

ления [34]:

$$H = \frac{I_{\text{л}} U_{\text{л}} (1 - 0,7\beta - 1,09 \cdot 10^{-9} m U_{\text{л}}) - 4r_{\text{л}}^2 \varepsilon \sigma_0 (T_{\text{в}} + 273)^4}{r_{\text{л}} V_{\text{св}} [\rho (cT_{\text{в}} + r_{\text{пл}}) + kr_{\mu} \rho + 5\lambda \left(0,5a + \frac{2}{V_{\text{св}} r_{\text{л}}}\right) T_{\text{пл}}]}, \quad (4.4)$$

где  $\beta$  — отношение числа отраженных электронов к общему числу излучаемых;  $m$  — порядковый номер элемента;  $T_{\text{в}}$  — температура ванны жидкого металла;  $k$  — отношение количества испарившегося материала к количеству расплавленного ( $k \approx 0,01$ );  $\varepsilon$  — коэффициент черноты;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана—Больцмана;  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость;  $r_{\text{пл}}$  — удельная теплота плавления;  $r_{\mu}$  — удельная теплота испарения;  $\lambda$  — теплопроводность;  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления.

Математические модели типа (4.4), полученные только на основе теоретических исследований физических процессов в системе, при использовании не только для качественных, но и для количественных оценок, требуют уточнения коэффициентов модели по экспериментальным данным.

Зависимости (4.1) — (4.4) характеризуют взаимосвязь выходных переменных сварного электронно-лучевого шва с регулирующими воздействиями в статике, т. е. статические характеристики сварного шва как объекта регулирования. Представление о динамике взаимосвязи глубины проплавления с регулирующими воздействиями дает рис. 4. 2. При скачке управляющего воздействия (тока луча  $I_{\text{л}}$ ) глубина  $H$  увеличивается по экспоненте с постоянной времени  $\tau_1$ . В дальнейшем темп углубления проплавления резко уменьшается и нарастание глубины шва до установившегося значения происходит с постоянной времени  $\tau_2$ . При ступенчатом уменьшении регулирующего воздействия глубина шва устанавливается практически безынерционно. Такое поведение сварочной ванны является спецификой ЭЛС с «кинжальным проплавлением». Углубление шва происходит инерционно, так как связано с нагревом до расплавления и перемещением определенного объема металла. Массы жидкого металла на передней стенке и дне парагазового канала, образующегося в свариваемом металле при воздействии на него электронного луча с высокой плотностью:

энергии, малы. Поэтому снятие перегрева жидкого металла сварочной ванны после снижения мощности внешнего источника нагрева не сопровождается дополнительным расплавлением основного металла, как это имеет место при дуговых методах сварки.

В линейном приближении динамические свойства сварного шва удобно описывать с помощью передаточных функций. Для таких управляющих воздействий, как ток луча, ускоряющее напряжение, плотность и мощность электронного луча, канал проплавления как объект регулирования в соответствии с рис. 4.2,а можно представить последовательно-параллельным соединением трех звеньев: двух инерционных первого порядка с передаточными функциями  $W_1(s) = \frac{1}{1 + s\tau_1\Phi}$

и  $W_2(s) = \frac{k_1}{1 + s\tau_2\Phi}$  соответственно и безынерционного с передаточной функцией  $W_3(s) = k_2$ . Функция  $\Phi$  показывает, что при углублении канала он ведет себя как инерционное звено и становится безынерционным при сбросе регулирующего воздействия:

$$\begin{aligned} \Phi &= 1 \text{ при } H(t) < (k_1 + k_2)j(t); \\ \Phi &= 0 \text{ при } H(t) \geq (k_1 + k_2)j(t). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\frac{H(s)}{I(s)} = W(s) = W_1(s) [W_2(s) + W_3(s)], \quad (4.5)$$

где  $H(s)$  — изображение глубины проплавления  $H$ ;  $I(s)$  — изображение регулирующего воздействия  $j(t)$  (тока луча  $I_l$ , ускоряющего напряжения  $U_l$  или тока фокусирующей линзы  $I_\Phi$ ),  $k = k_1 + k_2$  — коэффициент передачи, полученный из уравнений статики по соответствующим входным переменным. Для проплавления алюминиевых сплавов на глубину до 20 мм остросфокусированным лучом при  $V_{св} \approx 15$  мм/с постоянные времени модели имеют порядок  $\tau_1 \approx 20 \times 10^{-3}$  с,  $\tau_2 \approx 100 \cdot 10^{-3}$  с.

Несколько иной характер переходного процесса наблюдается при изменении эквивалентного поперечного размера луча, вызванного регулированием амплитуды его периодического отклонения. На рис. 4.2,б приведено изменение глубины проплавления  $H$  при включении и отключении синусоидального тока  $I_{отк}$  отклоняющей катушки. Ступенчатое увеличение амплитуды периодического отклонения эквивалентно увеличению диаметра электронного луча, а следовательно, уменьшению плотности мощности луча и приводит к мгновенному уменьшению глубины проплавления. По мере формирования более широкой полости проплавления глубина шва плавно увеличивается до нового установившегося значения. При резком уменьшении амплитуды периодического отклонения электронного луча глубина проплавления скачком увеличивается, а затем плавно уменьшается до установившегося значения. Это можно объяснить тем, что электронный луч малого диаметра воздействует на первоначально широкий канал проплавления, сформированный до этого широким вследствие периодического отклонения электронным лучом. В результате проплавления способность электронного луча в первый момент велика

и глубина проплавления резко возрастает. По мере формирования более узкого канала проплавления его глубина плавно уменьшается до нового установившегося значения. Таким образом, по этому управляющему воздействию канал проплавления можно представить дифференцирующим звеном с замедлением с передаточной функцией вида

$$\frac{H(s)}{I(s)} = W_5(s) = k \frac{1 + \tau_3 s}{1 + \tau_4 s}. \quad (4.6)$$

Для других выходных переменных сварного шва также можно получить передаточные функции, аналогичные (4.5), (4.6).

Параметры режима сварки, установленные исходя из условия получения заданного качества сварного шва, не удастся выдержать даже для одного протяженного шва и тем более при поочередной сварке различных заготовок. Причина этого — действие различных возмущений на сварочную установку. Так, напряжение питающей сети может изменяться на  $+10 \div -15\%$  от номинального значения. Температура элементов электронно-лучевой установки и электронных схем управления может изменяться вследствие саморазогрева на  $50^\circ\text{C}$  и более. Изменяются эмиссионная способность катода электронно-лучевой пушки и ее оптика из-за износа катода вследствие ионной бомбардировки, из-за отравления и напыления парами свариваемого металла, при переборке пушки для смены катода. Внутреннее сопротивление источника ускоряющего напряжения является причиной изменения ускоряющего напряжения при регулировании тока электронного луча. В результате рабочее ускоряющее напряжение отличается от установленного на холостом ходу.

Вследствие всех этих возмущений может изменяться ток электронного пучка, энергия ускоренных электронов, положение наименьшего сечения луча, углы его схождения и расхождения, закон распределения плотности тока по сечению, скорость сварки. Чтобы исключить влияние перечисленных возмущений на качество сварного соединения, необходимо автоматически стабилизировать заданные параметры режима сварки. Для этого применяют локальные автоматические регуляторы параметров режима ЭЛС, позволяющие исключить влияние на качество ЭЛС тех возмущений, которые воздействуют на параметры режима, а именно: колебания напряжения сети, температуры установки и т. п.

## **4.2. Требования к свойствам локальных регуляторов параметров режима электронно-лучевой сварки**

Структурная схема современной электронно-лучевой установки приведена на рис. 4.3. Все основные выходные переменные в ней стабилизированы локальными регуляторами параметров режима ЭЛС. Уставки на регуляторы поступают с ручных задатчиков либо от устройств централизованного управления, например от управляющей ЭВМ. Для этого все регуляторы должны иметь входы управления унифицированным электрическим сигналом, например напряжением постоянного тока  $0-10\text{ В}$ . Рассмотрим требования к статическим и динамическим свойствам локальных регуляторов параметров режима ЭЛС.

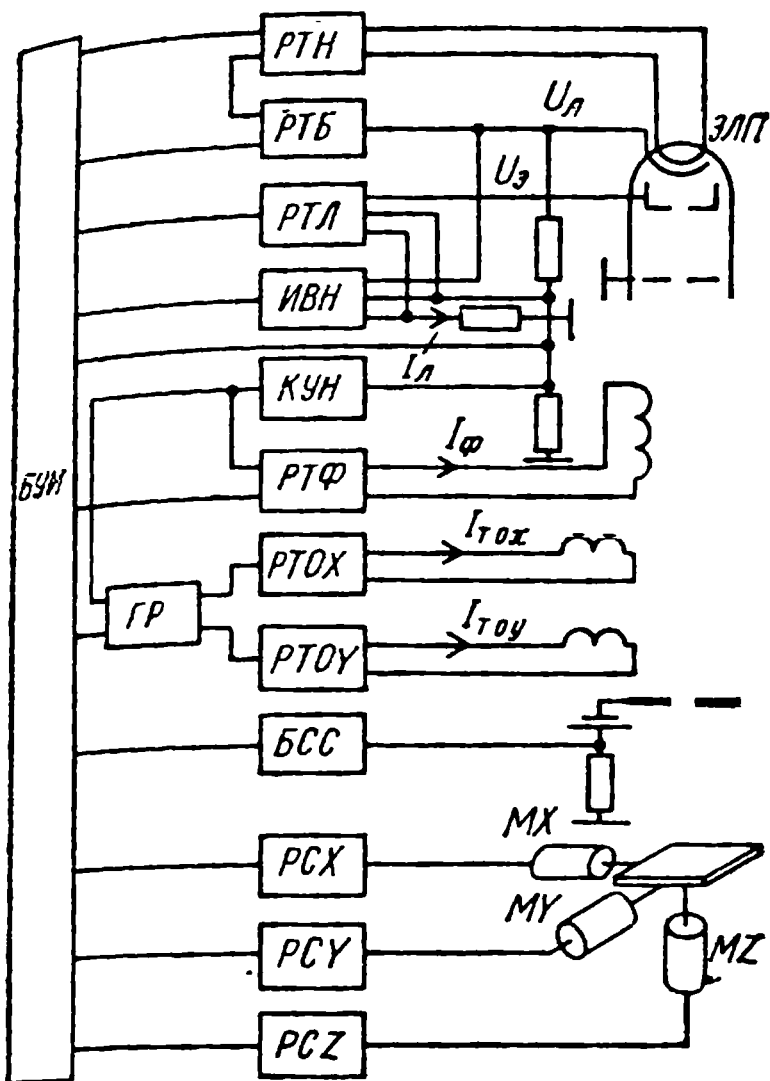


Рис. 4.3. Структурная схема установки для ЭЛС:

ЭЛП — электронно-лучевая пушка; РТН — регулятор тока нагрева; РТБ — регулятор тока бомбардировки; РТЛ — регулятор тока луча; ИВН — источник высокого напряжения; КУН — блок коррекции по ускоряющему напряжению; РТФ — регулятор тока фокусировки; РТОХ, РТОУ — регуляторы тока отклонения; ГР — генератор периодических разверток пучка; БСС — блок слежения за стыком и визуализации; РСХ, РСУ, РСЗ — регуляторы скорости приводов перемещения изделия; БУИ — блок задатчиков, управления, контроля и индикации

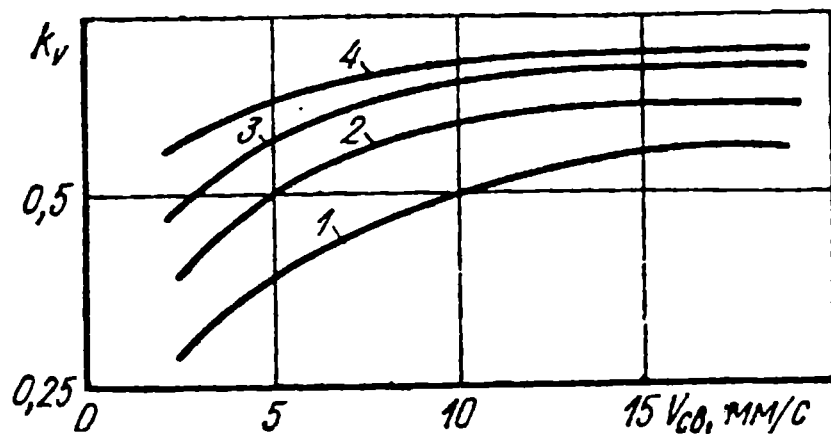


Рис. 4.4. Коэффициент передачи по скорости сварки железа при различных значениях радиуса электронного луча  $r_l$

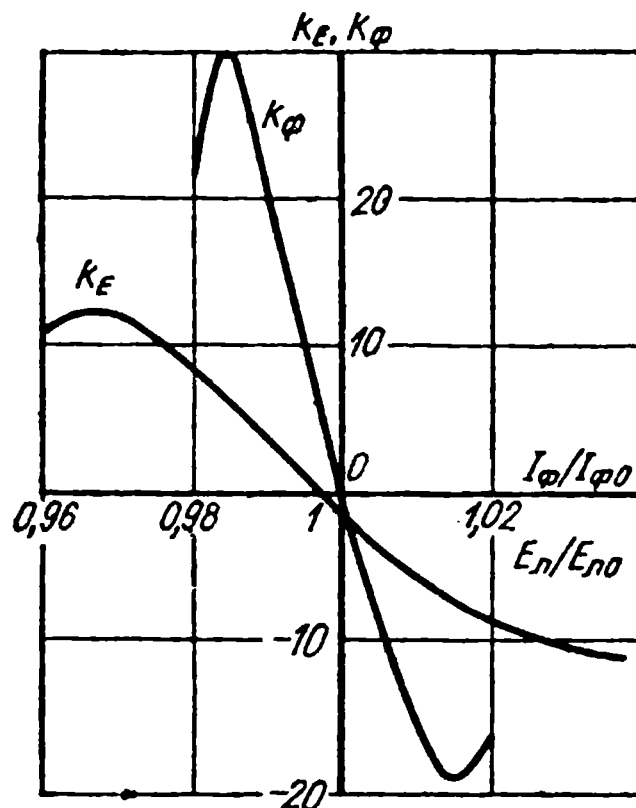


Рис. 4.5. Коэффициенты передачи по току фокусирующей линзы  $k_φ$  и ускоряющему напряжению  $k_E$

Аналитическую связь одного из важнейших параметров качества ЭЛС — глубины проплавления  $H$  — с основными параметрами режима сварки (током луча  $I_l$ , ускоряющим напряжением  $U_l$ , током фокусировки  $I_φ$  и скоростью сварки  $V_{св}$ ) дает уравнение (4.4). Используя его, найдем допустимую нестабильность параметров режима ЭЛС для заданной нестабильности глубины проплавления. Из (4.4) следует, что относительное изменение глубины проплавления равно относительному изменению ускоряющего напряжения  $U_l$  и при условии постоянства всех остальных параметров ( $I_l, V_{св}, r_l = \text{const}$ );

$$\frac{\Delta H}{H} = k_E \frac{\Delta U_l}{U_l},$$

где  $k_E$  — коэффициент передачи по ускоряющему напряжению,  $k_E = 1$ .

Аналогично для тока и мощности луча ( $Q_l$ ):

$$\frac{\Delta H}{H} = k_I \frac{\Delta I_l}{I_l}, \quad k_I = 1;$$

$$\frac{\Delta H}{H} = k_Q \frac{\Delta Q_l}{Q_l}, \quad k_Q = 1, \quad Q_l = I_l U_l.$$



Таким образом, параметры режима ( $U_{л}, I_{л}, Q_{л}$ ) должны стабилизироваться соответствующими регуляторами с точностью, определяемой допустимыми отклонениями глубины проплавления.

Связь глубины проплавления со скоростью сварки нелинейная. Линеаризуем эту зависимость для малых отклонений скорости, используя разложение зависимости (4.4) по степеням  $\Delta H$  и  $\Delta V_{св}$  и пренебрегая нелинейной частью ряда. В результате

$$\frac{\Delta H}{H} \approx k_V \frac{\Delta V_{св}}{V_{св}}.$$

Коэффициент передачи  $k_V$  зависит от скорости сварки и радиуса электронного луча  $r_{л}$  (рис. 4.4). Из рис. 4.4 видно, что  $k_V$  близок к 0,6 при обычно применяемых скоростях сварки. Следовательно, стабильность скорости сварки может быть вдвое меньше требуемой стабильности поддержания глубины проплавления.

Расчетная оценка зависимости глубины проплавления от относительного изменения тока фокусирующей линзы при ЭЛС железа (стали) на скорости  $V_{св} = 5$  мм/с позволяет определить коэффициент передачи по току фокусирующей линзы (рис. 4.5):

$$k_{ф. \max} = \frac{\Delta H}{H} \frac{I_{ф}}{\Delta I_{ф}} = 30.$$

Коэффициент передачи по ускоряющему напряжению определялся при предположении, что все остальные параметры оставались без изменения. В реальных условиях это не происходит. При изменении ускоряющего напряжения стабилизатор тока луча соответственно изменяет напряжение на управляющем электроде. В результате изменяется пространственное распределение плотности тока  $I_{л}$ , а для пушек с электромагнитной фокусировкой — положение наименьшего сечения луча  $L$  согласно выражению

$$L \approx \frac{(I_{ф} W_{ф})^2 l - U_{л} k}{U_{л} k},$$

где  $W_{ф}$  — число витков фокусирующей катушки;  $k$  — константа, характеризующая конструктивные параметры катушки;  $l$  — расстояние от пушки до центра фокусирующей катушки.

Соответственно изменяются радиус луча на поверхности свариваемого изделия и глубина проплавления. Зависимость результирующего коэффициента передачи  $k_E$  от  $U_{л}$  приведена на рис. 4.5. При наличии электромагнитной фокусирующей системы ускоряющее напряжение должно поддерживаться с точностью на порядок большей, чем при использовании длиннофокусных пушек.

Точность задания и стабильность поддержания каждого параметра режима  $X_i$  должна быть

$$\left(\frac{\Delta X}{X}\right)_i = \frac{1}{k_i} \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i, \quad (4.7)$$

где  $(\Delta H/H)_i$  — допустимое относительное изменение глубины вследствие нестабильности  $i$ -го параметра. Целесообразно выбирать  $(\Delta H/H)_i$  одинаковым для всех  $i$ .

Если колебания всех параметров происходят случайно и независимо друг от друга, то результирующее изменение глубины проплавления

$$\frac{\Delta H}{H} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i^2}$$

и для  $(\Delta H/H)_i = \text{const}$  получим

$$\left(\frac{\Delta H}{H}\right) = \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i \sqrt{N}.$$

В этом случае формула (4.7) принимает вид

$$\left(\frac{\Delta X}{X}\right)_i = \frac{1}{\sqrt{N}k_i} \left(\frac{\Delta H}{H}\right). \quad (4.8)$$

При  $\Delta H/H = 0,05$  допустимая нестабильность каждого из четырех ( $N = 4$ ) рассмотренных параметров сварочного режима составит соответственно:

$$\Delta I_{\text{л}}/I_{\text{л}} = 0,025; \Delta V_{\text{св}}/V_{\text{св}} = 0,0416; \Delta I_{\text{ф}}/I_{\text{ф}} = 0,00125; \Delta U_{\text{л}}/U_{\text{л}} = 0,0025.$$

Однако не всегда изменение параметров режима происходит независимо. Например, возмущения по напряжению сети приведут к одновременному изменению  $U_{\text{л}}$ ,  $I_{\text{л}}$ ,  $Q_{\text{л}}$ . В худшем случае

$$\frac{\Delta H}{H} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i$$

и допустимая нестабильность каждого параметра

$$\left(\frac{\Delta X}{X}\right)_i = \frac{1}{4k_i} \left(\frac{\Delta H}{H}\right). \quad (4.9)$$

При этом погрешность, например тока фокусирующей катушки  $I_{\text{ф}}$ , не должна превосходить 0,0006. Чтобы избежать необходимости такой строгой стабилизации тока  $I_{\text{ф}}$ , следует исключить влияние колебаний напряжения сети, по крайней мере, на регулятор тока фокусировки. Этого можно достичь, используя для питания регулятора стабилизированное напряжение.

Приведенные характеристики статической точности локальных регуляторов получены для конкретных режимов ЭЛС железа (стали). Для иных режимов сварки и материалов они будут другими, однако их соотношение и порядок величин остается приблизительно постоянным.

Следует отметить, что ЭЛС в основном применяется для соединений, требующих сквозного проплавления. Это вызвано характерными для ЭЛС дефектами неполного проплавления — случайными колебаниями относительно среднего уровня глубины проплавления и сопровождающими их порами, пустотами, несплавлениями. Требования к стабильности параметров режима сварки швов со сквозным проплавлением могут быть ниже и выбираются из условия гарантированного сквозного проплавления.

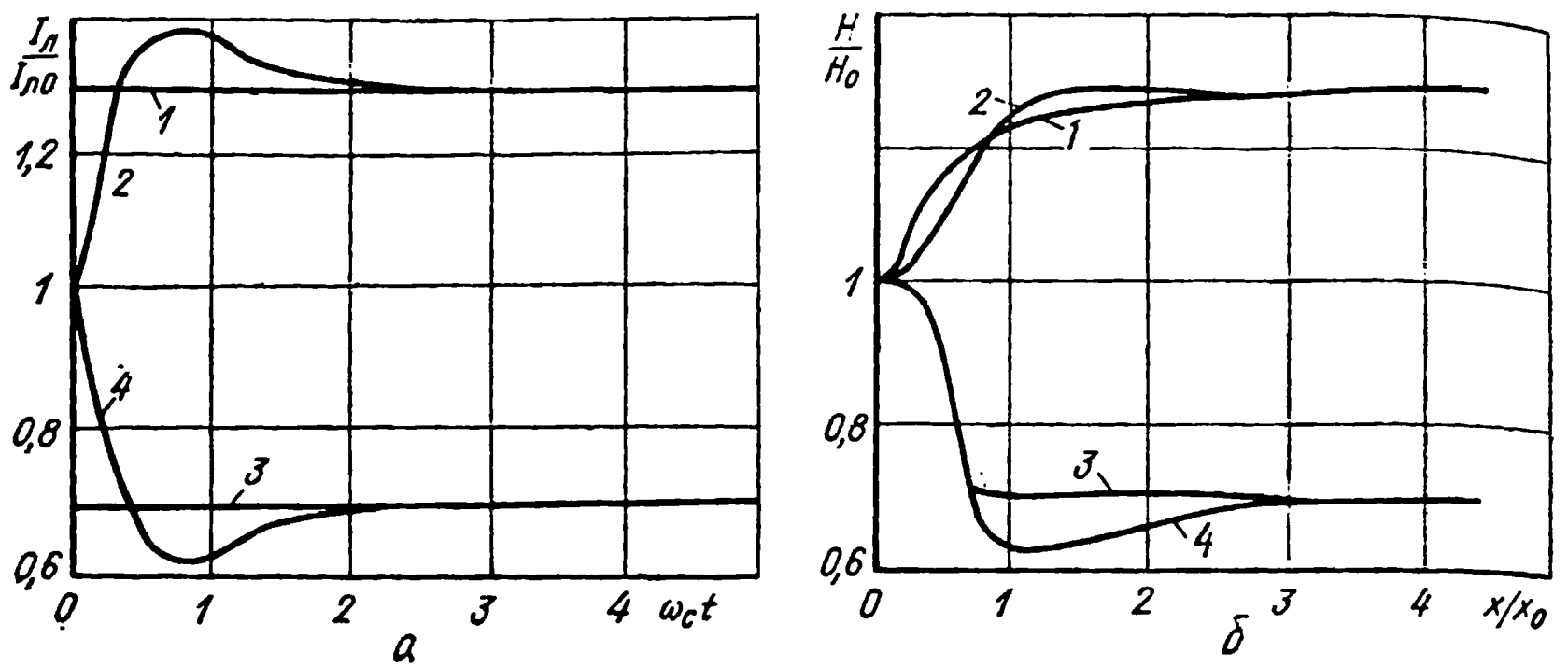


Рис. 4.6. Переходные процессы при программном регулировании глубины проплавления: а — программное ступенчатое изменение относительного тока электронного луча  $I_d/I_{d0}$  во времени; б — изменение относительной глубины проплавления  $H/H_0$  по длине

При ЭЛС изделий сложного профиля с изменяющейся толщиной, а также при сварке замкнутых швов с выводом кратера возникает необходимость в быстром программном изменении тока (мощности) электронного пучка. Формирование сварного шва происходит безынерционно. Динамические характеристики регуляторов должны быть настолько высокими, чтобы существенно не затягивать переходной процесс в системе регулятор — сварной шов. Качество переходного процесса в такой системе оценивается по реакции на ступенчатое изменение задающего сигнала регулятора. При этом выходной сигнал регулятора устанавливается лишь после некоторого переходного процесса, определяемого параметрами регулятора.

Частота среза  $\omega_c$  логарифмической амплитудно-частотной характеристики регулятора (частота единичного усиления при разомкнутой обратной связи) приходится на участок с наклоном — 20 дБ/декада. При достаточной ширине этого участка переходный процесс в системе заканчивается за время  $t_{пер} \approx (7 \div 10)/\omega_c$ . Чтобы динамические характеристики регулятора не сказывались на переходных процессах программного изменения глубины проплавления сварного шва, необходимо соблюдение условия  $\omega_c \gg 1/\tau_1$ . Для примера на рис. 4.6 приведено рассчитанное с применением передаточных функций (4.5) программное изменение глубины проплавления сварного шва при ЭЛС для безынерционного и реального регуляторов.

Идеальный безынерционный регулятор мгновенно обрабатывает программное увеличение (кривая 1, рис. 4.6, а) и уменьшение (кривая 3, рис. 4.6, а) тока луча  $I_d$ . Этим изменениям тока луча соответствует наиболее резкое изменение глубины проплавления (кривые 1 и 3 рис. 4.6, б). В реальном высококачественном регуляторе с  $\omega_c = 10/\tau_1$  переходный процесс установления тока луча быстро затухает (кривые 2 и 4 рис. 4.6, а), в результате чего скорость изменения глубины проплавления (кривые 2 и 4 рис. 4.6, б) мало отличается от максимально возможной.

Требования к динамическим характеристикам регуляторов тока фокусирующих линз обычно жестко не регламентируются, поскольку

этот ток во время сварки не регулируется, а возмущения, действующие на него, чрезвычайно медленные. Однако необходимость в высоком быстродействии этих регуляторов резко возрастает при использовании мощного сварочного луча для автоматического слежения за стыком во время сварки (см. § 4.6). В этом случае ток  $I_{\phi}$  периодически ступенчато изменяют на время вывода луча из зоны сварки.

Скорость перемещения луча по поверхности свариваемого изделия в режиме слежения должна быть настолько большой, чтобы не вызывать плавление поверхности. В противном случае помехи от образующейся плазмы не позволяют надежно выделять полезный сигнал. Исходя из этого условия для ЭЛС железа время сканирования стыка можно приближенно определить по формуле

$$t_c \approx r_{\text{л}}^3 / (R_0 Q_{\text{л}}^2), \quad (4.10)$$

где  $R_0$  — радиус траектории сканирования стыка, мм. Для типичных значений  $Q_{\text{л}} = 12,5$  кВт,  $r = 0,55$  мм,  $R_0 = 5$  мм, по формуле (4.10) получим  $t_c = 0,2$  мс.

При ЭЛС больших толщин луч фокусируется ниже поверхности изделия. Для слежения за свариваемым стыком необходима фокусировка на поверхности. Зондирование свариваемого стыка производится перемещением электронного луча поперек стыка впереди сварочной ванны. На перемещение луча в зону зондирования и обратно затрачивается приблизительно по 25 % времени  $t_c$ . За это время ток фокусировки должен измениться до установившегося значения, т. е. время отработки единичного скачка системой фокусировки должно составлять не более 50 мкс.

Время сканирования можно значительно уменьшить, если на период зондирования стыка снижать ток сварки. В этом случае максимальное значение  $t_c$  ограничивается допустимым временем прерывания процесса сварки и быстродействием системы регулирования тока луча. Без ущерба для качества сварки луч можно прерывать на время

$$t_{\text{пр}} \approx (0,2/V_{\text{св}}) r_{\text{л}},$$

что составляет примерно 10 мс при  $V_{\text{св}} = 10$  мм/с и  $r_{\text{л}} = 0,5$  мм. В этом случае регуляторы тока луча и тока фокусировки должны обрабатывать скачкообразное изменение задания за время 1—2 мс.

Динамические характеристики регуляторов тока системы электромагнитного отклонения электронного луча определяются частотой и формой тока отклонения. Наиболее часто используются синусоидальная, треугольная и пилообразная формы токов отклонения. Частота синусоидального отклонения тока луча обычно не превышает 1—2 кГц. Такую же полосу пропускания должен иметь регулятор тока отклонения, что обеспечивается при частоте среза разомкнутой схемы  $\omega_c \approx 2\pi f_{\text{от}}$ .

При автоматическом слежении за стыком наименьшую полосу пропускания требует синусоидальная развертка электронного луча. Если время отклонения луча равно 1 мс, то необходимая частота синусоидальной развертки равна 1 мГц. С ростом мощности электронного луча требуемая ширина частотной характеристики системы расширяется до 10—100 кГц.

Для линейного перемещения луча используется пилообразный либо треугольный закон изменения тока отклоняющих катушек. Для неискаженного воспроизведения таких токов требуется бесконечно широкая полоса пропускания устройства отклонения. При одинаковой скорости перемещения луча и одинаковых искажениях передача треугольного сигнала требует в 6 раз более узкой полосы пропускания системы отклонения, чем передача пилообразного сигнала. Поэтому во всех случаях отдают предпочтение треугольному току отклонения. Искажения закона изменения тока отклонения вследствие ограничений полосы пропускания системы приводят к увеличению результирующей плотности тока на границах формируемого источника нагрева. При полосе пропускания в 10 раз большей, чем частота тока треугольной развертки, эквивалентная плотность мощности на краях зоны отклонения превышает средний уровень примерно на 20 %.

### 4.3. Типовые локальные регуляторы параметров режима электронно-лучевой сварки

Рассмотрим примеры локальных регуляторов режима ЭЛС второго У-250 и третьего ЭЛА 60/60 поколения, применяемых в электронно-лучевых сварочных установках.

**Регуляторы ускоряющего напряжения.** В стандартных установках для ЭЛС наибольшее распространение получили два вида регуляторов ускоряющего напряжения, отличающихся по типу регулирующего элемента: регуляторы с *силовым магнитным усилителем* (рис. 4.7) и с *проходной электронной лампой* (рис. 4.8).

Магнитный усилитель МУ (рис. 4.7) включен последовательно с силовым повышающим трансформатором  $T$ . В зависимости от тока управляющей обмотки  $W_y$  изменяется падение напряжения на МУ, а следовательно, и ускоряющее напряжение электронно-лучевой пушки ЭЛП. Сигнал, пропорциональный ускоряющему напряжению, снимается с делителя напряжения  $R1, R2$  и сравнивается с заданным

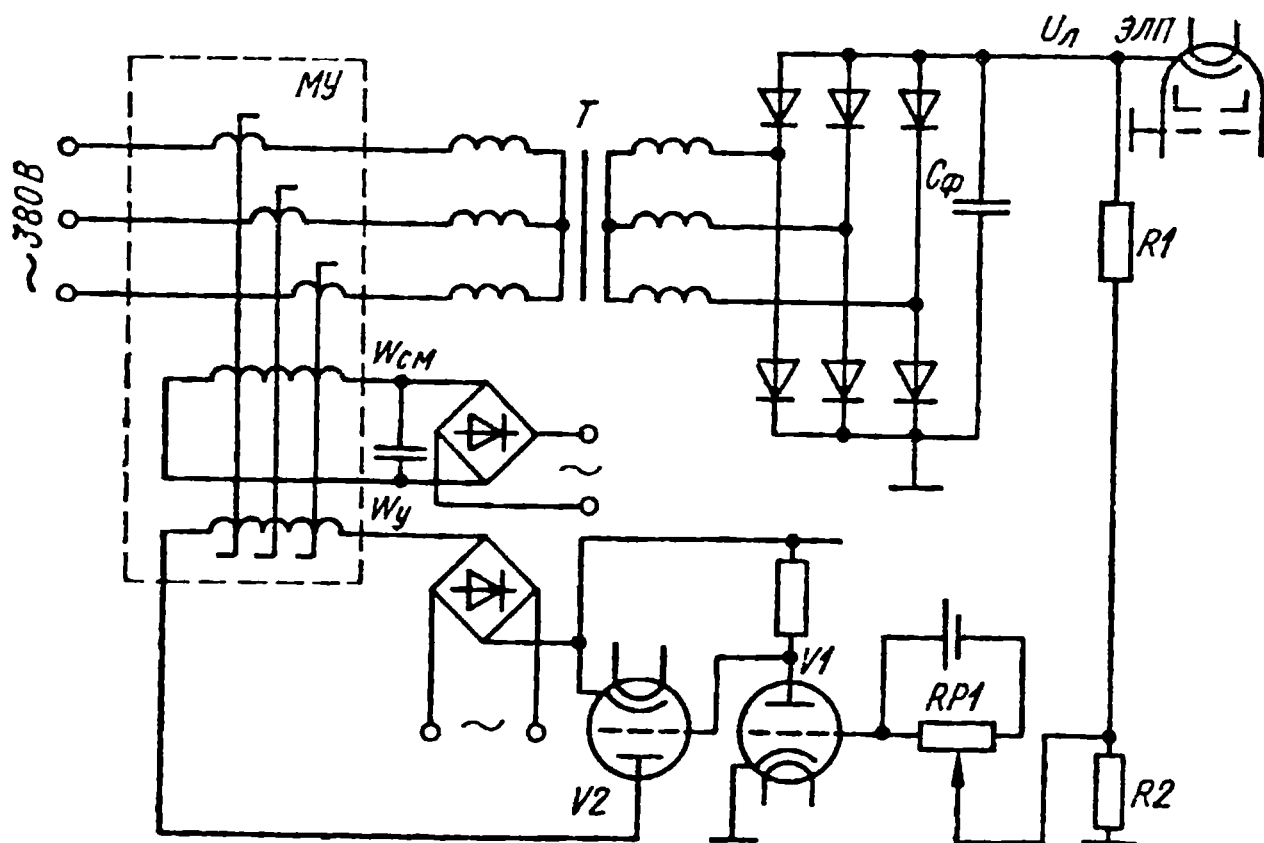


Рис. 4.7. Упрощенная принципиальная схема регулятора ускоряющего напряжения У-250

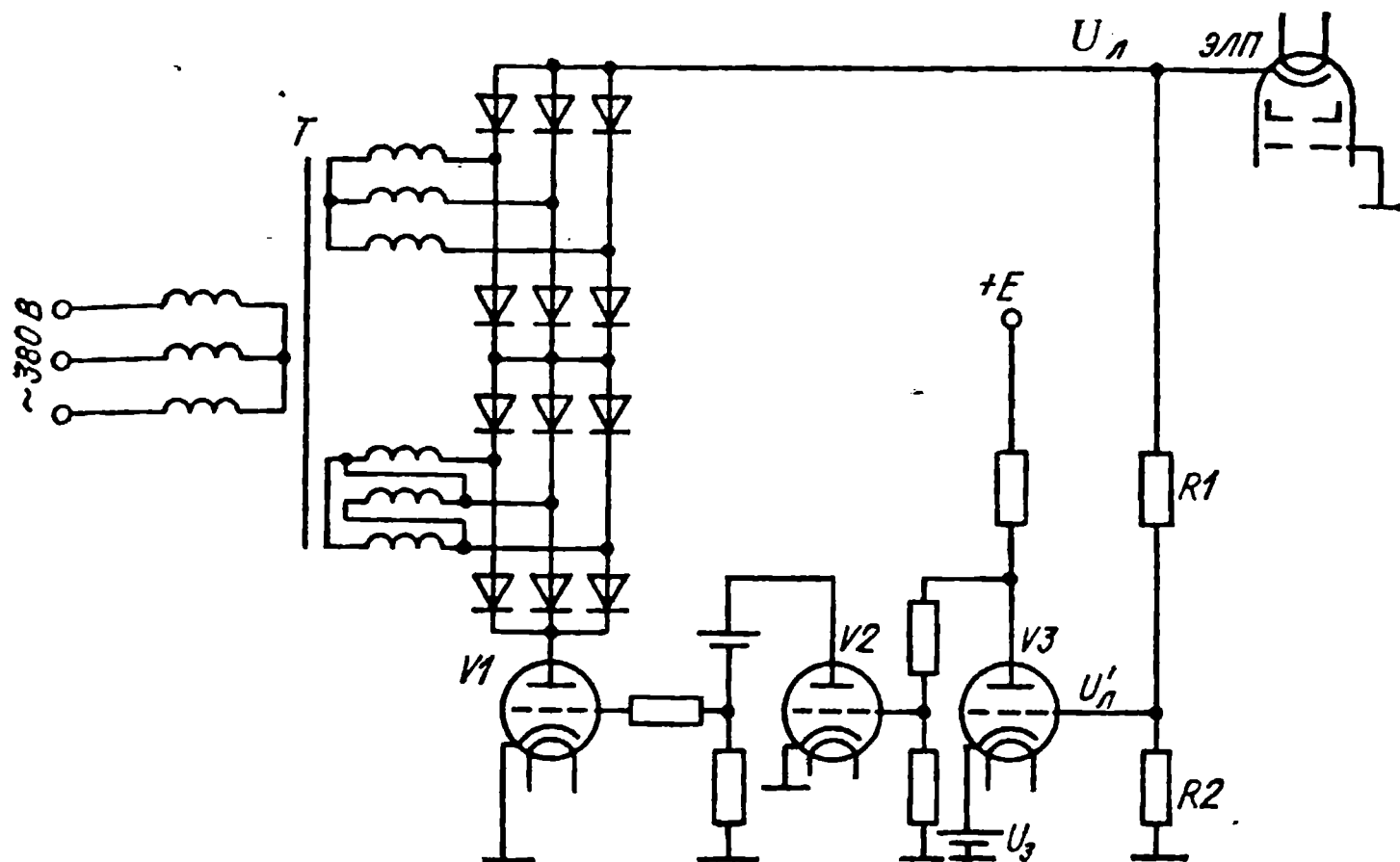


Рис. 4.8. Упрощенная принципиальная схема регулятора ускоряющего напряжения ЭЛА 60/60

(устанавливается при помощи потенциометра  $RP1$ ). Разность этих напряжений усиливается электронными лампами  $V1$  и  $V2$  и подается на обмотку управления  $W_y$ . Таким образом, осуществляется общая отрицательная обратная связь по ускоряющему напряжению, стабилизирующая его с высокой точностью независимо от причин, вызвавших эти изменения. Недостаток регулятора — малое быстродействие (при включении тока луча ускоряющее напряжение устанавливается за 0,5 с, а при сбросе тока до нуля — за несколько секунд), отсутствие входа для связи с внешними устройствами управления.

Лучшими характеристиками обладают стабилизаторы с проходной электронной лампой. Мощная электронная лампа  $V1$  (рис. 4.8), рассчитанная на ускоряющее напряжение 60 кВ и ток луча до 1 А, включается между полюсом высоковольтного источника питания и «землей». Напряжение, пропорциональное ускоряющему напряжению, снимается с делителя  $R1, R2$  и подается на сетку лампы  $V3$ . К промежутку сетка-катод  $V3$  приложена сумма заданного  $U_3$  и стабилизируемого  $U'_л$  напряжений. Полученное рассогласование усиливается лампами  $V3$  и  $V2$  и поступает на сетку регулирующей лампы  $V1$ , замыкая общую отрицательную обратную связь по ускоряющему напряжению.

Достоинством схемы, показанной на рис. 4.8, является высокое быстродействие, что позволяет существенно уменьшать либо полностью исключить высоковольтные фильтрующие конденсаторы. При этом ускоряющее напряжение практически не зависит от медленных и быстрых изменений тока электронного луча, существенно уменьшаются токи короткого замыкания при высоковольтных пробоях в пушке, так как, во-первых, их величина ограничивается внутренним сопротивлением лампы  $V1$ , а во-вторых, мала реактивная мощность, накопленная в системе из-за отсутствия высоковольтных конденсаторов.

**Регуляторы тока электронного луча.** Ток триодных электронно-лучевых пушек от нуля до максимума регулируется изменением от



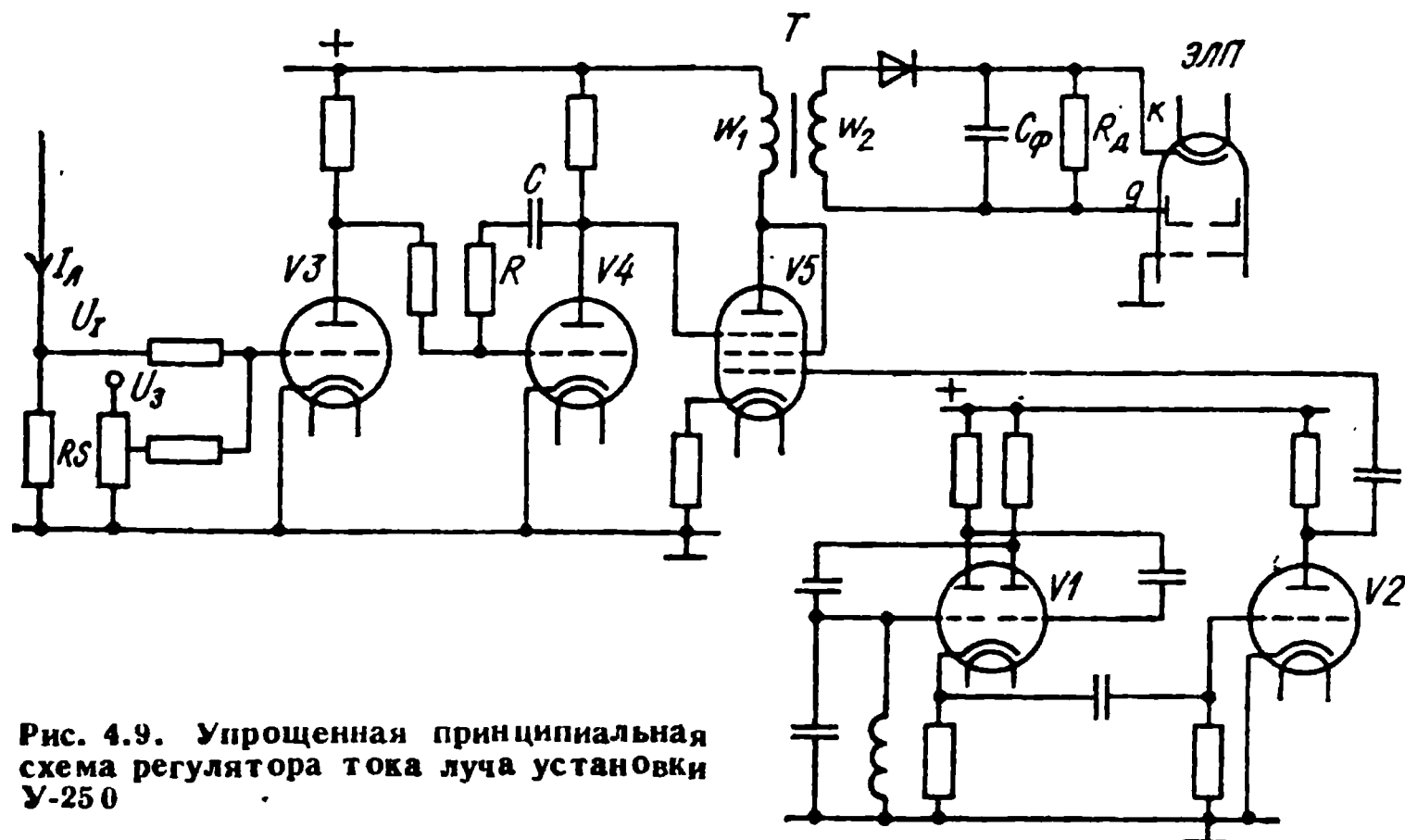


Рис. 4.9. Упрощенная принципиальная схема регулятора тока луча установки У-250

3 кВ до нуля напряжения смещения, приложенного между катодом  $K$  и управляющим электродом  $g$  (рис. 4.9). Регуляторы тока отличаются друг от друга по способу изменения напряжения смещения и по способу передачи управляющего сигнала с низкой стороны на высокую.

В регуляторе тока установки У-250 (рис. 4.9) напряжение  $U_1$ , пропорциональное току луча  $I_n$ , снимается с резистора  $RS$ , включенного между положительным полюсом источника ускоряющего напряжения и «землей». Это напряжение сравнивается с заданным  $U_3$ , и их разность поступает на сетку  $V3$ . Усиленное  $V3$  и  $V4$  рассогласование подается на третью сетку лампы  $V5$ , на первую сетку которой поступает переменное напряжение частотой 40—60 кГц с генератора  $V1—V2$ . В результате переменное напряжение, приложенное к первичной обмотке  $W_1$  высокопотенциального трансформатора  $T$ , будет пропорционально напряжению рассогласования. Индуцируемое во вторичной обмотке  $W_2$  напряжение выпрямляется диодом, сглаживается емкостью  $C_f$  и подается на управляющий электрод электронно-лучевой пушки ЭЛП, замыкая общую отрицательную обратную связь по току луча. Корректирующая цепь  $RS$  обеспечивает устойчивость и требуемое качество переходного процесса регулятора. Предельное быстродействие регулятора определяется постоянной времени цепочки  $C_f R_d$  ( $C_f$  — распределенная емкость высоковольтного кабеля, 200—500 пФ/м). Реально регулятор отрабатывает изменение тока луча с частотой не выше 50 Гц.

**Регулятор тока бомбардировки катода ЭЛП.** Широкое распространение в ЭЛП получили катоды с косвенным подогревом — электронной бомбардировкой. Между лантанборидным катодом 1 (рис. 4.10) и прямоканальным вольфрамовым подогревателем 2 электроны ускоряются и бомбардируют катод, разогревая его. Вследствие напыления подогревателя лантанборидом и действия положительной термической обратной связи между катодом и подогревателем такая система оказывается практически неработоспособной — ток бомбардировки крайне неустойчив. Для устранения этого недостатка применяют автоматиче-

скую стабилизацию тока бомбардировки. С этой целью в установке У-250 ток канала подогревателя регулируется мало-мощным магнитным усилителем МУ (рис. 4.10), обмотка управления  $W_y$  которого запитывается напряжением  $U_1$ , пропорциональным току бомбардировки  $I'_6$ . На обмотку смещения  $W_{см}$  подано задающее напряжение  $U_3$ . Магнитные потоки, создаваемые обмотками  $W_y$  и  $W_{см}$ , вычитаются и в зависимости от их разности МУ изменяют ток накала подогревателя, а вместе с ним и ток бомбардировки катода. В результате любые изменения тока бомбардировки сводятся к минимуму, обеспечивая устойчивую работу системы подогрева.

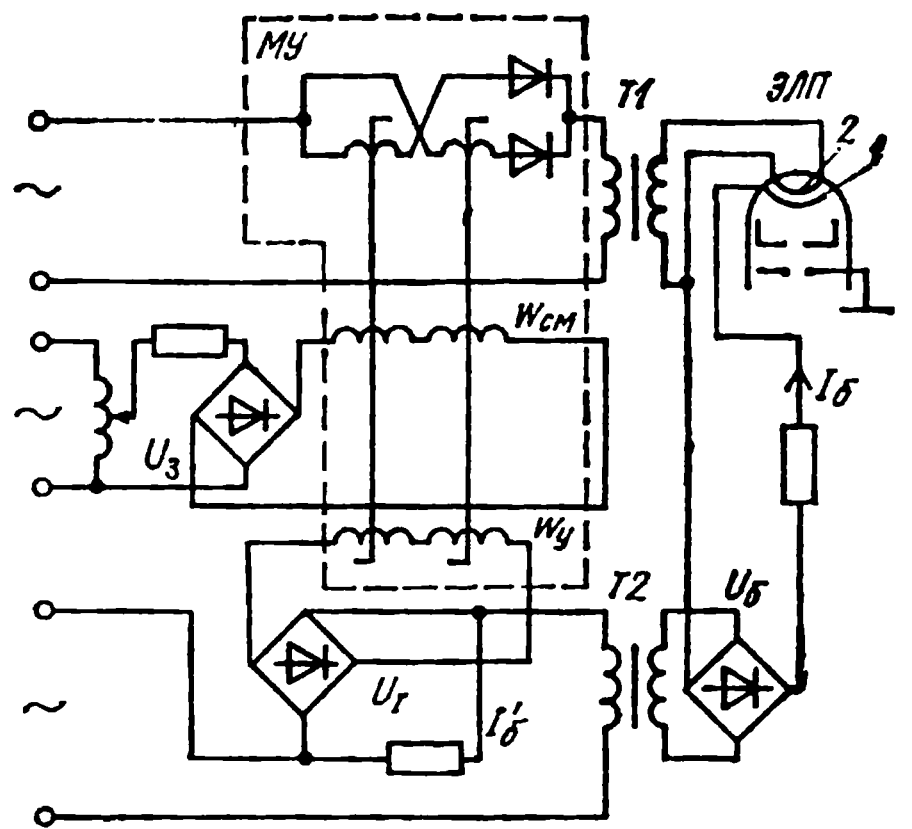


Рис. 4.10. Принципиальная схема регулятора тока бомбардировки катода установки У-250

Магнитный усилитель в стабилизаторе тока бомбардировки может быть заменен симметричным тиристором  $VS1$  (рис. 4.11). Напряжение  $U_1$ , пропорциональное току бомбардировки, сравнивается с заданным  $U_3$  в схеме суммирования, усиливается полупроводниковым усилителем  $VT1$  и подается на схему формирования включающих импульсов тиристора  $VT2$ ,  $VT3$ . При изменении тока бомбардировки фаза этих импульсов относительно напряжения сети изменяется так, чтобы в результате регулирования тока накала подогревателя ток бомбардировки  $I_6$  оставался практически неизменным. Преимуществом тиристорных регуляторов перед регуляторами с магнитным усилителем является более высокая точность, обусловленная применением дополнительного усилителя рассогласования на транзисторе  $VT1$ , и лучшие

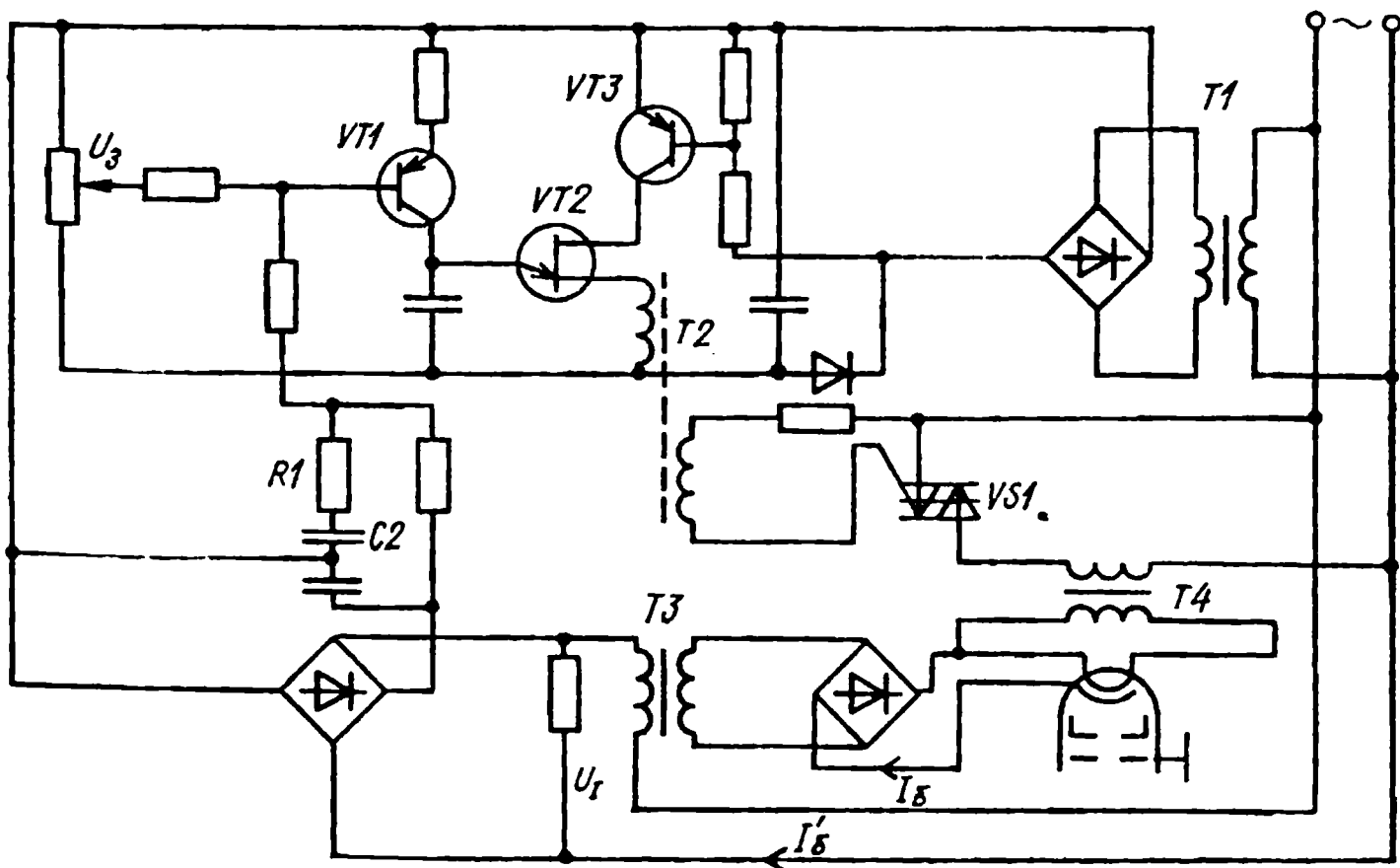


Рис. 4.11. Принципиальная схема тиристорного регулятора тока бомбардировки катода

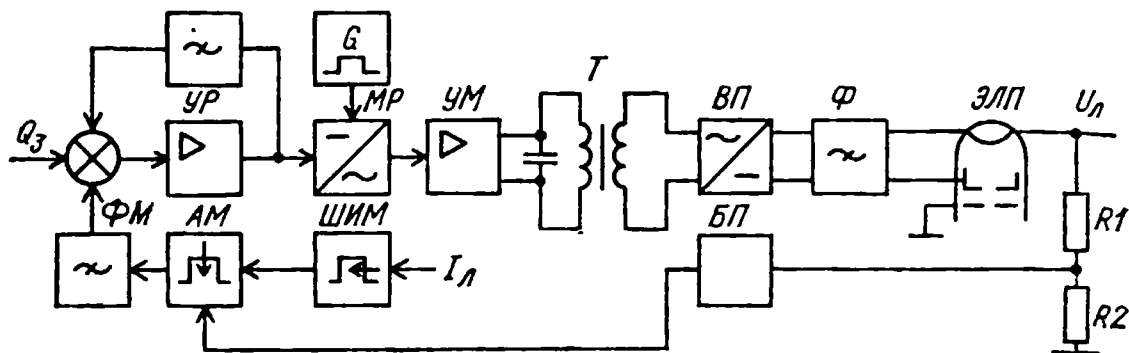


Рис. 4.12. Функциональная схема регулятора мощности электронного луча

динамические характеристики, поскольку в нем отсутствует инерционность, характерная для МУ, а динамика полностью определяется выбранными параметрами корректирующей цепочки  $R1-C2$ . Кроме того, тиристорный регулятор имеет значительно меньшие габариты и легче согласуется с внешними управляющими устройствами.

**Регулирование мощности электронного луча.** Как следует из уравнения (4.4), при прочих равных условиях глубина проплавления зависит не столько от тока луча и энергии электронов, сколько от его мощности. Следовательно, для стабилизации глубины проплавления необходимо стабилизировать мощность луча. Это можно осуществить, одновременно стабилизируя —  $U_{л}$  и  $I_{л}$  двумя независимыми регуляторами [12] либо стабилизируя произведение  $U_{л}I_{л} = Q_{л}$  одной системой автоматического регулирования. От регулятора тока такой регулятор отличается только датчиком мощности и оказывается существенно проще комбинированной системы регулятор тока — регулятор напряжения.

Стабилизация мощности при регулировании ускоряющего напряжения и тока луча приводит к несколько отличающимся результатам. Это связано с влиянием регулировок на другие параметры — рассеяние электронов в канале проплавления, изменение радиуса луча и положение наименьшего сечения луча и т. п. Однако при влиянии малых возмущений на режим сварки ими можно пренебречь.

При стабилизации мощности режим сварки определяется не четырьмя ( $U_{л}, I_{л}, I_{ф}, V_{св}$ ), а тремя параметрами ( $Q_{л}, I_{ф}, V_{св}$ ). Вследствие этого при 5 %-й нестабильности глубины проплавления допустимая нестабильность мощности, рассчитываемая согласно формуле (4.8), составит:

$$\Delta Q_{л}/Q_{л} = 0,05/(\sqrt{3} k_Q) = 0,029.$$

Функциональная схема регулятора мощности приведена на рис. 4.12. В качестве датчика мощности в нем использовано множительное устройство, основанное на принципе амплитудно-широтной модуляции. Сигнал, пропорциональный ускоряющему напряжению, снимается с делителя напряжения  $R1 R2$ , преобразуется в двухполярное напряжение блоком БП и поступает на амплитудный модулятор АМ. Сигнал, пропорциональный току луча, подается на широтно-импульсный модулятор ШИМ, напряжение которого поступает на АМ. На выходе амплитудного модулятора АМ получаем сигнал переменного тока с частотой 8 кГц, постоянная составляющая которого пропорцио-

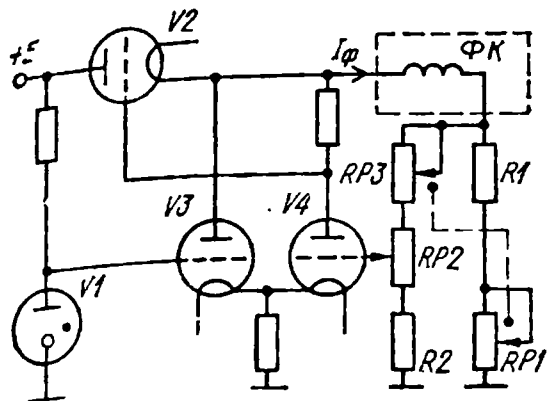


Рис. 4.13. Стабилизатор тока фокусирующей катушки установки У-250

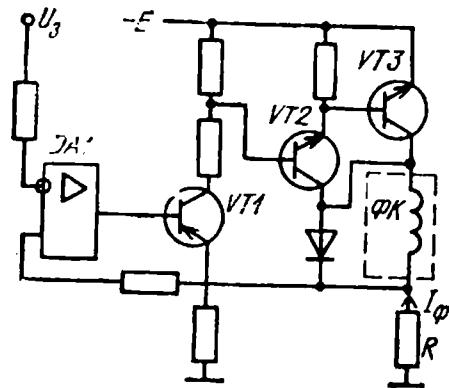


Рис. 4.14. Полупроводниковый стабилизатор тока фокусирующей катушки

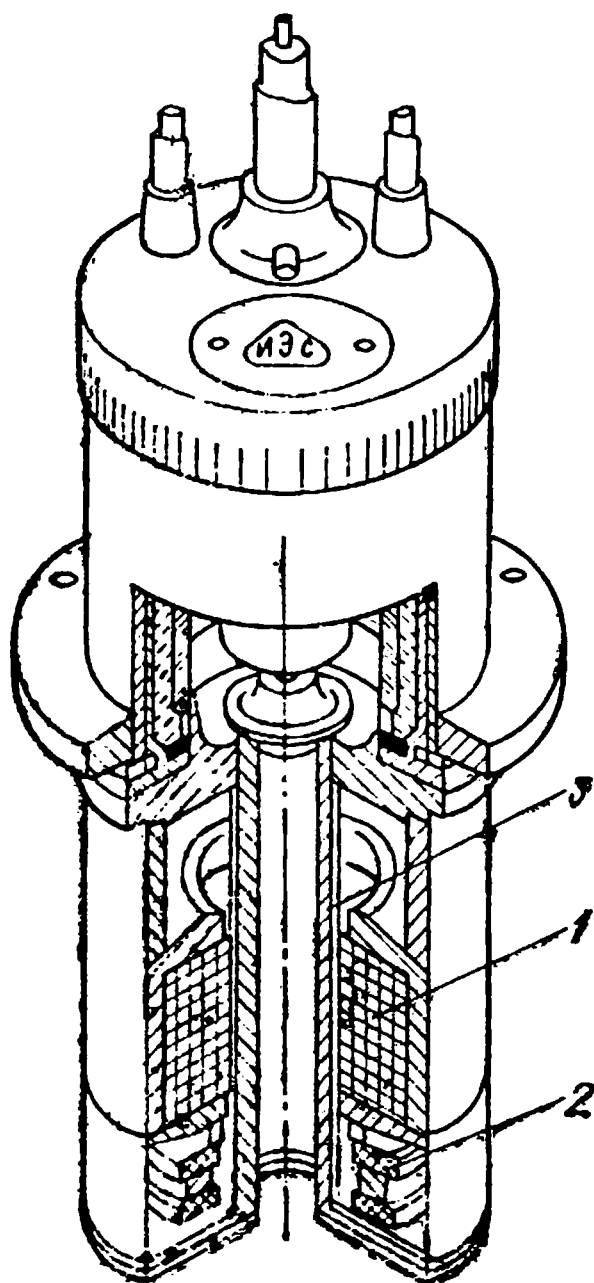
нальная произведению мгновенных значений тока и энергии луча. Отфильтрованный фильтром  $\Phi М$  сигнал мощности сравнивается с заданным и подается на усилитель рассогласования  $УР$ . Усиленное рассогласование преобразуется модулятором  $МР$  в переменное напряжение, усиливается по мощности усилителем  $УМ$  и поступает на разделительный трансформатор  $T$ . После выпрямления и фильтрации вторичное напряжение трансформатора подается на управляющий электрод электронно-лучевой пушки  $ЭЛП$ .

Регулятор обеспечивает точность стабилизации параметра  $Q_L$  не менее 0,5 % в условиях, при которых изменения этого параметра достигают  $\pm 50$  % без применения регулятора. Скорость обработки скачкообразного изменения задания не превосходит 5 мс при перерегулировании около 20 % и 1—2 колебаниях за время переходного процесса. При стабилизации  $Q_L = U_L I_L$  ускоряющее напряжение может колебаться. Для пушек с магнитной фокусировкой это приводит к непостоянству диаметра фокального пятна, а следовательно, и глубины проплавления. Поэтому регуляторы мощности, предназначенные для пушек с магнитной фокусировкой, должны комплектоваться устройствами автоматической коррекции тока фокусирующей линзы при изменении ускоряющего напряжения.

**Регуляторы тока  $I_\phi$  фокусирующей линзы.** Они должны обеспечивать чрезвычайно высокую точность стабилизации (см. § 4.2). В электронно-лучевых установках второго поколения (типа У-250) напряжение, пропорциональное току  $I_\phi$  фокусирующей катушки  $\Phi К$  (рис. 4.13), снимается с резисторов  $R_2$ ,  $RP_2$  и подается на один из входов дифференциального усилителя, выполненного на лампах  $V_3$ ,  $V_4$ . На другой вход усилителя подается опорное напряжение, снимаемое со стабилвольта  $V_1$ . Разность этих напряжений управляет лампой  $V_2$ , определяющей ток линзы  $\Phi К$ . Тем самым замыкается цепь общей отрицательной обратной связи регулятора. Изменение величины тока линзы осуществляется сдвоенным потенциометром  $RP_1$ ,  $RP_3$ .

Регуляторы этого типа не обеспечивают высокой длительной стабильности тока фокусировки, поскольку задающее напряжение определяется работой стабилвольта  $V_1$ , дрейф напряжения которого составляет несколько десятых процента. Недостаток регуляторов — отсутствие входа управления электрическим сигналом, что не позволяет сопрягать регулятор с числовой системой программного управления либо УВМ.

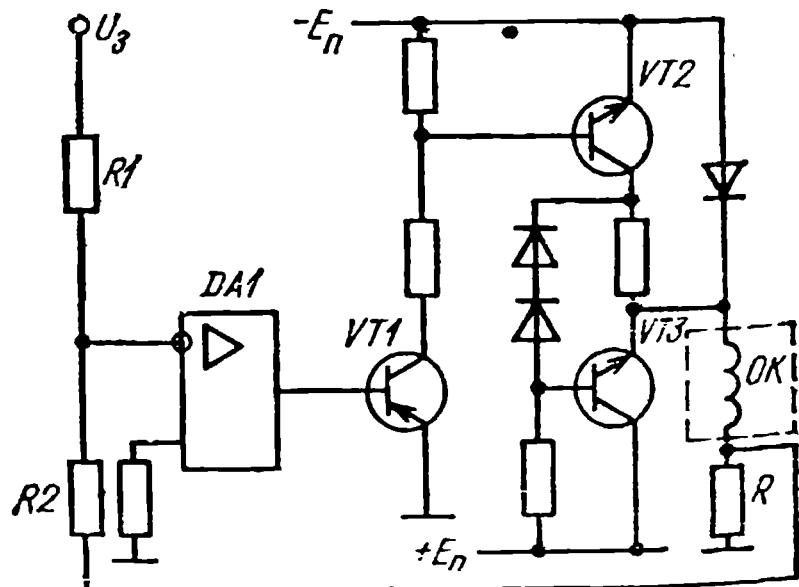
Современные регуляторы тока  $I_{\phi}$  выполняют на полупроводниковых элементах (рис. 4.14). Напряжение, пропорциональное току  $I_{\phi}$ , снимается с прецизионного стабильного резистора  $R$  и поступает на неинвертирующий вход операционного усилителя  $DA1$ . На инвертирующий вход усилителя подается задающее напряжение  $U_3$ . Разность этих напряжений усиливается микросхемой  $DA1$  и транзисторами  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VT3$ . В цепи коллектора составного транзистора  $VT2$ ,  $VT3$  включена фокусирующая катушка  $\Phi K$ . Высокий коэффициент усиления операционного усилителя  $DA1$  и малый входной ток его неинвертирующего входа обеспечивает прецизионное регулирование тока  $I_{\phi}$  с точностью не ниже 0,01 % при изменении питающего напряжения на  $\pm 15$  % и сопротивления  $\Phi K$  на 30 %. Длительная стабильность тока фокусировки полностью определяется качеством резистора  $R$  и точностью поддержания задающего напряжения  $U_3$ , для формирования которого используются высокостабильные термокомпенсированные стабилитроны. В транзисторных регуляторах тока  $I_{\phi}$  применяются низкоомные катушки фокусирующих линз — 10 Ом вместо 1000 Ом для ламповых схем. Такие катушки содержат меньшее число витков, а следовательно, имеют существенно более низкую индуктивность, что при том же питающем напряжении резко расширяет частотную полосу пропускания устройства. Однако полностью использовать это преимущество можно только в пушках с соответствующей конструкцией фокусирующе-отклоняющей системы (ФОС). Большинство сварочных пушек содержит массивный медный лучепровод 3 (рис. 4.15), защищающий фокусирующую линзу 1 и отклоняющую систему 2 от теплового воздействия сварочной ванны и случайного попадания на них электронного пучка. При быстром изменении фокусирующего (отклоняющего)



магнитного поля в лучепроводе наводятся вихревые токи, магнитное поле которых компенсирует изменение первичного магнитного поля. В результате частотная характеристика ФОС реально ограничивается частотой менее 50 Гц. Для устранения этого явления лучепровод полностью исключают или выполняют из тонкой нержави-

Рис. 4.15. Электронно-лучевая пушка У-530М

Рис. 4.16. Регулятор тока отклоняющей катушки



вующей стали, имеющей большое удельное сопротивление, что резко снижает величину вихревых токов.

**Регуляторы тока отклоняющих катушек.** Они должны обеспечивать диапазон изменений тока  $\pm 100\%$  с точностью до  $\approx 2\%$ . Полоса пропускания системы отклонения должна быть более 1 кГц.

Для питания отклоняющих катушек в современных установках используются мощные полупроводниковые усилители, охваченные глубокой отрицательной обратной связью по выходному току (рис. 4.16). Основное усиление выходного сигнала осуществляется интегральным операционным усилителем  $DA1$ . Выходные каскады на транзисторах  $VT1—VT3$  служат для усиления по мощности и для повышения максимального выходного напряжения схемы. Сигнал обратной связи по току снимается с резистора  $R$ , включенного последовательно с отклоняющей катушкой  $OK$ . Этот сигнал через резистор  $R2$  поступает на вход  $DA1$ , на который через резистор  $R1$  подается также управляющее напряжение. Разность этих напряжений усиливается схемой  $DA1$ . Таким образом, в регуляторе осуществляется глубокая отрицательная обратная связь по току отклоняющей катушки, делая его нечувствительным к изменению сопротивления катушки  $OK$ , колебаниям питающего напряжения, изменению коэффициента усиления микросхемы  $DA1$  и транзисторов  $VT1—VT3$ . Важное свойство замкнутой обратной связи по регулируемой величине — резкое расширение полосы пропускания регулятора. Для дальнейшего расширения полосы пропускания до нескольких килогерц применяют низкоомные маловитковые отклоняющие катушки, высокое напряжение питания выходного каскада и исключают медный лучепровод из системы отклонения.

#### **4.4. Программное управление параметрами режима электронно-лучевой сварки**

При отключении тока пучка для прекращения сварки в конце шва остается более или менее глубокий кратер, классифицируемый как дефект шва. Чтобы избежать подобных дефектов при завершении сварки, ток пучка вручную плавно уменьшают до нуля. Однако при этом появляются дефекты в корне шва, что часто также недопустимо.

*Программное изменение тока луча и тока фокусирующей линзы*, выполняемое одновременно в конце сварки, позволяет исключить эти дефекты. Двухканальное устройство, позволяющее получать произвольный закон изменения тока пучка и тока фокусировки, приведено на рис. 4.17 (программатор входит в состав аппаратуры ЭЛА 60).

Принцип работы устройства заключается в следующем. Программа изменения тока сварки и фокусировки разбивается на 15 равных временных интервалов длительностью 0,2—2 с каждый. К делителю задающего напряжения тока пучка (фокусировки)  $R1—R14$  ( $R15—R28$ ) подключены 16 аналоговых ключей (МОП-транзисторов)  $VF1—VT16$  ( $VT17—VT32$ ), выводы которых объединены. Каждый ключ подсоединен к той или иной точке делителя, что индицируется положением переключателя  $X1—X16$  ( $X17—X32$ ) на наборном поле. Схема управления последовательно один за другим подключает ключи к де-



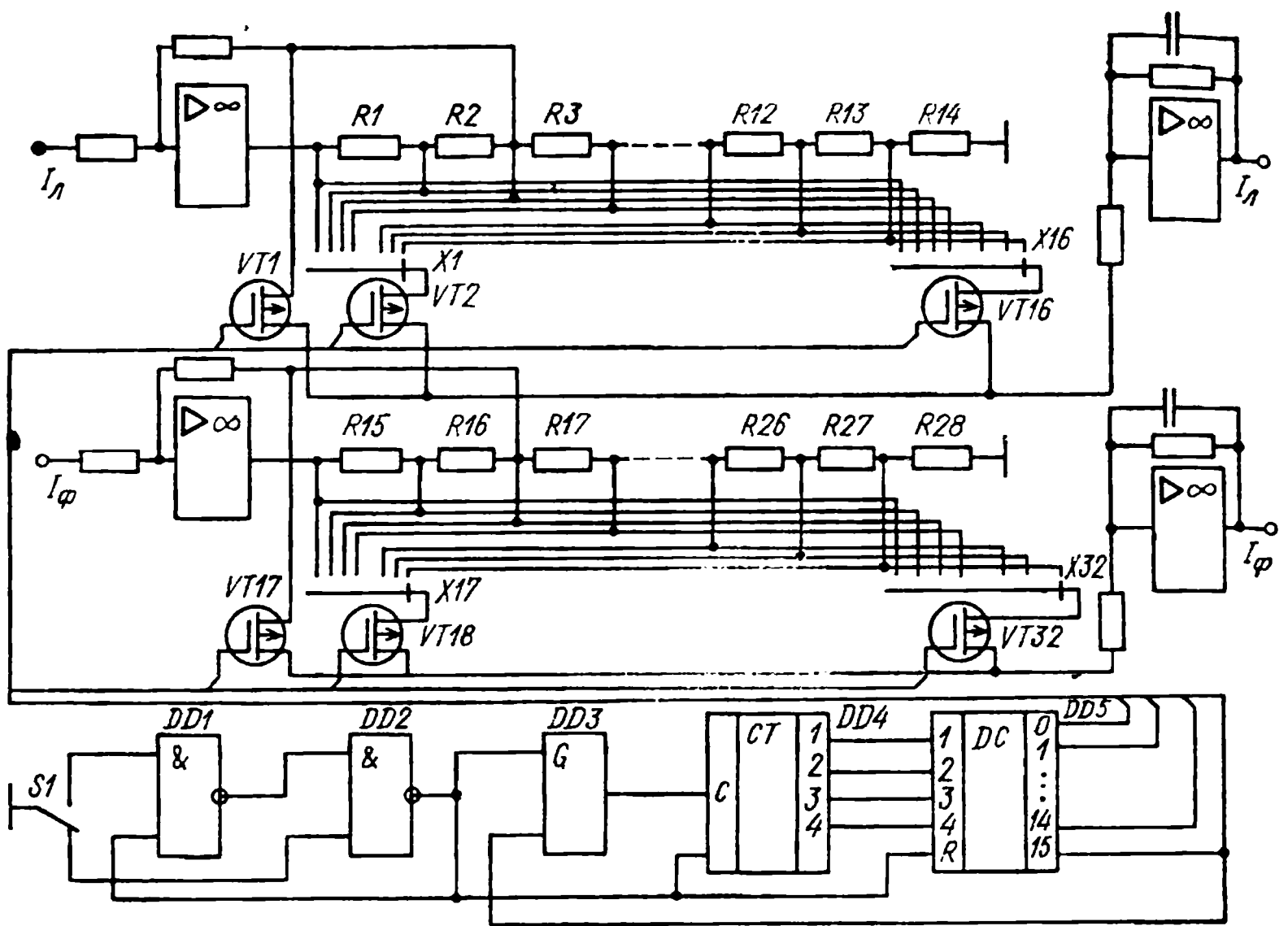


Рис. 4.17. Принципиальная схема устройства программного изменения тока луча и тока фокусировки для вывода кратера

лителю напряжения, в результате чего на ее выходе образуется изменяющееся во времени ступенчатое напряжение, используемое в дальнейшем как задающее для регулятора тока пучка (фокусировки). Схема запускается замыканием внешнего контакта  $S1$ . В результате переключается триггер  $DD1, DD2$ , примененный для устранения дребезга контактов  $S1$ . Триггер запускает генератор тактовой частоты  $G$  ( $DD3$ ). Импульсы генератора поступают на счетчик  $CT$  ( $DD4$ ), на выходе которого формируется четырехразрядный код, соответствующий числу поступивших импульсов. Этот код подается на вход дешифратора  $DC$  ( $DD5$ ), на выходе (одном из 16) которого поочередно появляется высокое напряжение. Это напряжение включает соответствующий ключ. После замыкания 16-го ключа цикл работы прекращается. Для повторной работы необходимо разомкнуть и снова замкнуть внешний контакт. Оба канала — канал задания тока пучка и канал задания тока фокусировки — независимо программируемы и синхронно управляются одной схемой управления.

*Программное перемещение электронного луча* используется для выполнения швов со сложным контуром небольшой протяженности, например, для ЭЛС корпусов электромагнитных реле, транзисторов и т. п. При очень быстром периодическом перемещении электронного луча его можно рассматривать как неподвижный источник нагрева, но с новым результирующим распределением плотности мощности в поперечном сечении. Такие лучи широко используются при ЭЛС больших толщин для уменьшения дефектов шва, для термообработки поверхностей электронным лучом и т. п.

Перемещение электронного луча на небольшое расстояние по поверхности свариваемого изделия наиболее удобно выполнять при

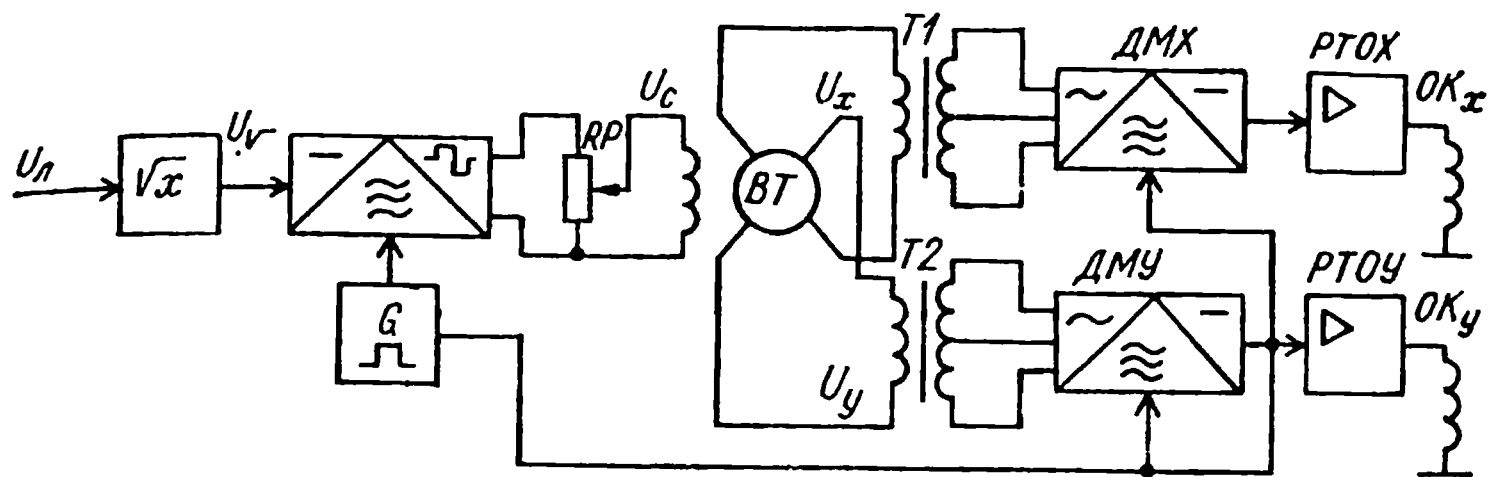


Рис. 4.18. Функциональная схема устройства электромагнитного перемещения электронного луча по окружности

электромагнитном отклонении электронного луча. С этой целью соответствующим образом программируется ток отклоняющих катушек. Наибольшее распространение получили программные устройства для перемещения электронного луча по линейным и круговым траекториям.

Для перемещения луча по кругу (эллипсу) через катушки электромагнитного отклонения луча по двум взаимно перпендикулярным направлениям  $x$  и  $y$  пропускается синусоидальный ток. Из аналоговых низкочастотных синус-косинусных генераторов наилучшими характеристиками обладают вращающиеся трансформаторы (рис. 4.18). Устройство работает следующим образом. На вход модулятора подается постоянное напряжение, пропорциональное квадратному корню из ускоряющего напряжения  $U_{v-} = \sqrt{U_n}$  электронно-лучевой пушки, благодаря чему устраняется влияние  $U_n$  на диаметр описываемой окружности. В большинстве случаев для приближенной реализации этой зависимости используется кусочно-линейная аппроксимация, легко реализуемая аппаратно:

$$U_{v-} = U_0 + kU_n,$$

где  $U_0$  — постоянное напряжение;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Погрешность аппроксимации составляет  $\pm 0,4\%$  при изменении ускоряющего напряжения на  $+20\%$ . На другой вход модулятора подается переменное напряжение 400 Гц от генератора  $G$ . На выходе модулятора получаем переменное напряжение, величина которого пропорциональна корню квадратному из ускоряющего напряжения. Это напряжение подается на статорную обмотку вращающегося трансформатора  $BT$ . С роторных обмоток снимаются напряжения:

$$\begin{aligned} U_x &= kU_c \sin \varphi; \\ U_y &= kU_c \cos \varphi, \end{aligned}$$

где  $U_c$  — переменное напряжение, приложенное к статорной обмотке;  $\varphi$  — угол поворота ротора;  $k$  — коэффициент трансформации.

Выпрямленные демодуляторами  $ДМХ$  и  $ДМУ$  напряжения поступают на входы усилителей тока отклонения  $РТОХ$  и  $РТОУ$ . Диаметр окружности, описываемой электронным лучом, регулируется потенциометром  $RP$ . Скорость перемещения луча регулируется скоростью вращения  $BT$  двигателем.

Для высокочастотных ( $f \geq 1$  кГц) разверток используются электронные генераторы синус-косинусных напряжений.

Практически неограниченный набор траекторий и любую точность электромагнитного перемещения луча можно получить с помощью цифровых программаторов, в частности, с использованием интерполяторов [1].

#### 4.5. Автоматическое управление качеством сварного шва

Конечная цель автоматического регулирования процесса ЭЛС — обеспечение заданного качества сварного шва. Описанные в § 4.4 устройства автоматического регулирования непосредственно не используют информацию о качестве шва. Они устраняют влияние на качество некоторых возмущений, например, колебание питающего напряжения, изменение параметров установки вследствие нагрева, старения. Поэтому их можно рассматривать лишь как местные контуры обратной связи в общей разомкнутой системе автоматического управления качеством швов. Для того чтобы замкнуть систему по качеству шва, его необходимо прежде всего измерить во время сварки.

В настоящее время можно в некоторых случаях измерить во время сварки один из наиболее важных параметров, характеризующих качество швов, глубину проплавления. Наиболее просто это осуществить при сквозном проплавлении. С тыльной стороны свариваемого изделия 1 (рис. 4.19) устанавливается изолированный коллектор электронов 2, соединяемый с «землей» через измерительный резистор  $R$ . При полном проплавлении свариваемого образца в нем образуется сквозной парогазодинамический канал и часть электронов пучка попадает на коллектор 2. Образующееся при этом падение напряжения на резистор  $R$  усиливается блоком согласования БС, сравнивается с заданным и их разность подается на регулятор РГ. Сигнал регулятора воздействует на блок регулирования какого-либо параметра режима сварки, например ускоряющего напряжения, скорости сварки, но наиболее часто — тока луча (БНС), как это показано на рис. 4.19 для триодной пушки ЭЛП. Регулятор стабилизирует заданное значение сквозного тока  $I_{скв}$ , являющегося одним из показателей процесса ЭЛС (см. рис. 4.1), что гарантирует 100 % проплавление при большинстве возмущений, действующих на процесс. Зазор в стыке перед

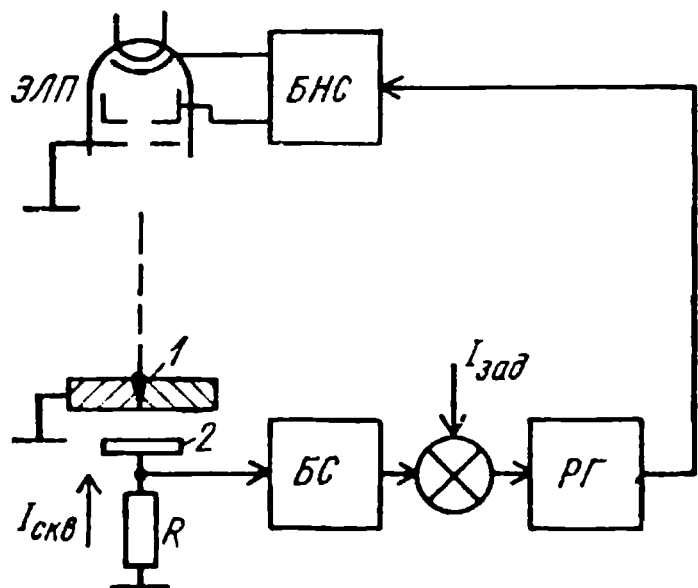


Рис. 4.19. Регулятор сквозного тока

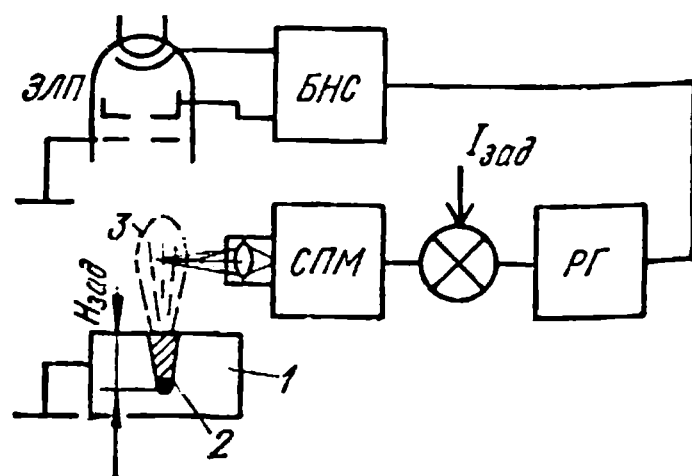


Рис. 4.20. Регулятор интенсивности свечения паров металла-свидетеля

сваркой должен быть достаточно мал, чтобы заметно не влиять на сквозной ток. Другие параметры качества сварного шва (подрезы, высота верхнего валика, провисание корня шва и т. д.) регулируется подбором значений  $I_{скв}$ , а также настройкой динамических характеристик регулятора в случае его достаточного быстрого действия. Особенно эффективно применение регуляторов сквозного тока при ЭЛС деталей с переменной толщиной. В этом случае отпадает необходимость в предварительном жестком программировании режима сварки.

При неполном проплавлении глубину шва можно регулировать путем стабилизации интенсивности свечения паров металла-свидетеля, проволока из которого закладывается на глубину заданного проплавления. При достижении заданной глубины проплавления  $H_{зад}$  проволока 2 (рис. 4.20) расплавляется. Над сварочной ванной появляются ее пары 3. В составе проволоки обязательно должен быть химический элемент, имеющий в спектре излучения линию, которая отсутствует в спектре паров свариваемого металла 1. Спектрометр СММ измеряет интенсивность этой линии спектра свечения ионизированных паров 3 над сварочной ванной. Сигнал спектрометра после сравнения с заданным  $I_{зад}$  подается на регулятор РГ, который подключен к блоку напряжения смещения БНС электронно-лучевой пушки ЭЛП. Таким образом, замыкается отрицательная обратная связь по свечению паров металла-свидетеля, что гарантирует глубину проплавления, по крайней мере, не меньшую заданной.

Стабилизация глубины шва при неполном проплавлении может обеспечиваться также автоматическим регулятором с датчиком ДРИ (рис. 4.21), регистрирующим рентгеновское излучение 2 из канала проплавления на заданной глубине свариваемого образца. При относительно неглубоких швах датчик располагается так, как это показано на рис. 4.21, а, а при ЭЛС больших толщин — как изображено на рис. 4.21, б. Во всех случаях толщина стенки между областью рентгеновского излучения и датчиком должна быть порядка нескольких миллиметров.

Тормозное рентгеновское излучение возникает в месте взаимодействия высокоэнергетического электронного луча со свариваемым металлом 1. Узконаправленный датчик рентгеновского излучения визируется на область заданной глубины проплавления. При появлении сигнала датчика схема автоматического регулирования отключает на короткое время электронный луч либо кратковременно отклоняет его по направлению сварки на небольшое расстояние. Подобные регуляторы целесообразно применять для высоковольтных электронно-лучевых установок ( $U_{л} \geq 100$  кВ), поскольку интенсивность и проникающая способность рентгеновского излучения пропорциональна энергии электронов.

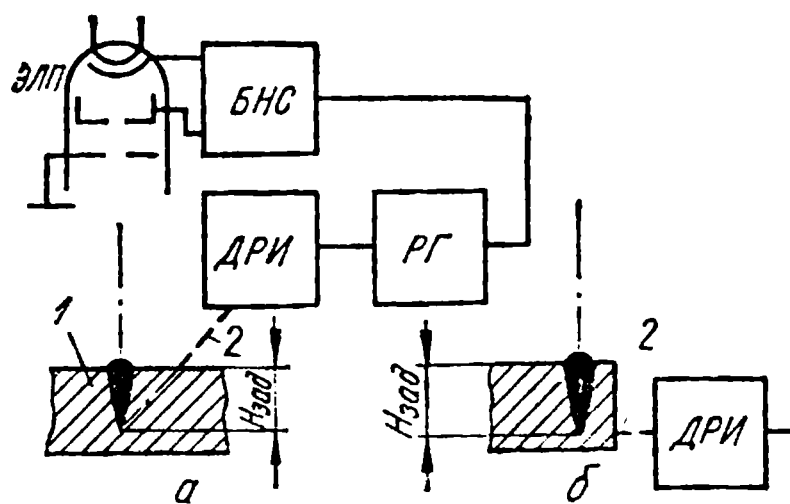


Рис. 4.21. Регулирование глубины проплавления по рентгеновскому излучению

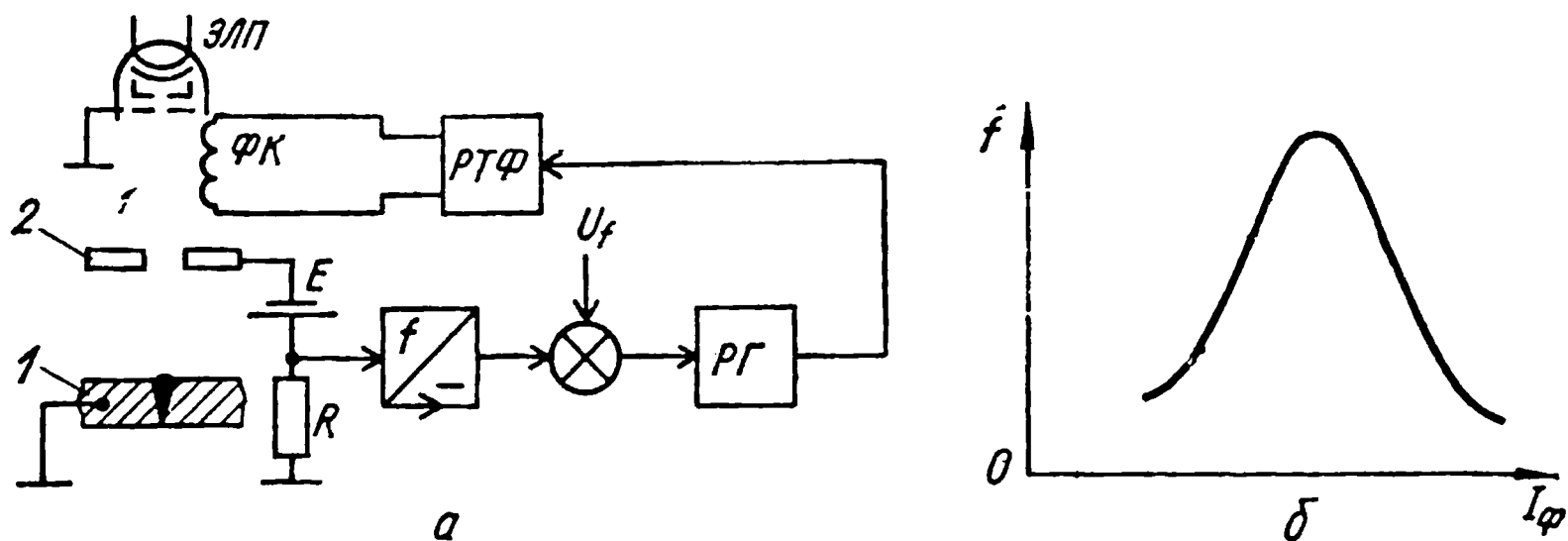


Рис. 4.22. Регулятор тока фокусирующей линзы по частоте ионного тока из сварочной ванны

Для того чтобы автоматически регулировать плотность мощности электронного пучка на поверхности свариваемого изделия, а также и глубины проплавления, используются сигналы ионного тока из сварочной ванны. Для этого на срезе фокусирующе-отклоняющей системы устанавливается изолированный коллектор 2 (рис. 4.22,а), соединяемый с «землей» через последовательно включенные источник  $E$  отрицательного напряжения 100 В и измерительный резистор  $R$ . При воздействии электронного луча на свариваемый металл 1 появляются пары, которые частично ионизируются вторичными электронами из сварочной ванны. Ионы, достигая коллектора 2, создают нестационарное падение напряжения на резисторе  $R$ . Установлено, что усредненная за несколько секунд частота  $f$  импульсов этого напряжения связана экстремальной зависимостью с током  $I_{\phi}$  фокусирующей линзы и с удельной мощностью электронного пучка в пятне нагрева (рис. 4. 22,б). Устройство автоматического регулирования стабилизирует заданную частоту пульсаций ионного тока на выбранном склоне регулировочной характеристики. Для этого измеряется частота пульсаций и знак производной частоты от тока фокусирующей линзы. Устройство позволяет автоматически поддерживать заданную фокусировку электронного луча на поверхность свариваемого изделия в некотором диапазоне расстояний от пушки до изделия. Параметры сигнала ионного тока из сварочной ванны наиболее тесно коррелированы с процессами, происходящими на поверхности свариваемого изделия. Поэтому с уменьшением толщины свариваемого металла надежность результатов, получаемых при регулировании глубины проплавления воздействием на плотность мощности электронного луча, возрастает.

#### 4.6. Системы наведения и автоматического направления электронного луча по стыку свариваемых кромок

Малые значения диаметра электронного луча и ширины сварного шва требуют точного совмещения электронного луча со стыком свариваемых кромок. Ручное наведение на стык при наблюдении за местом сварки через иллюминатор затруднено, а иногда и просто невозможно. В этом случае в зоне сварки располагают специальные оптические или телевизионные устройства [22]. Некоторые электронно-лучевые устройства

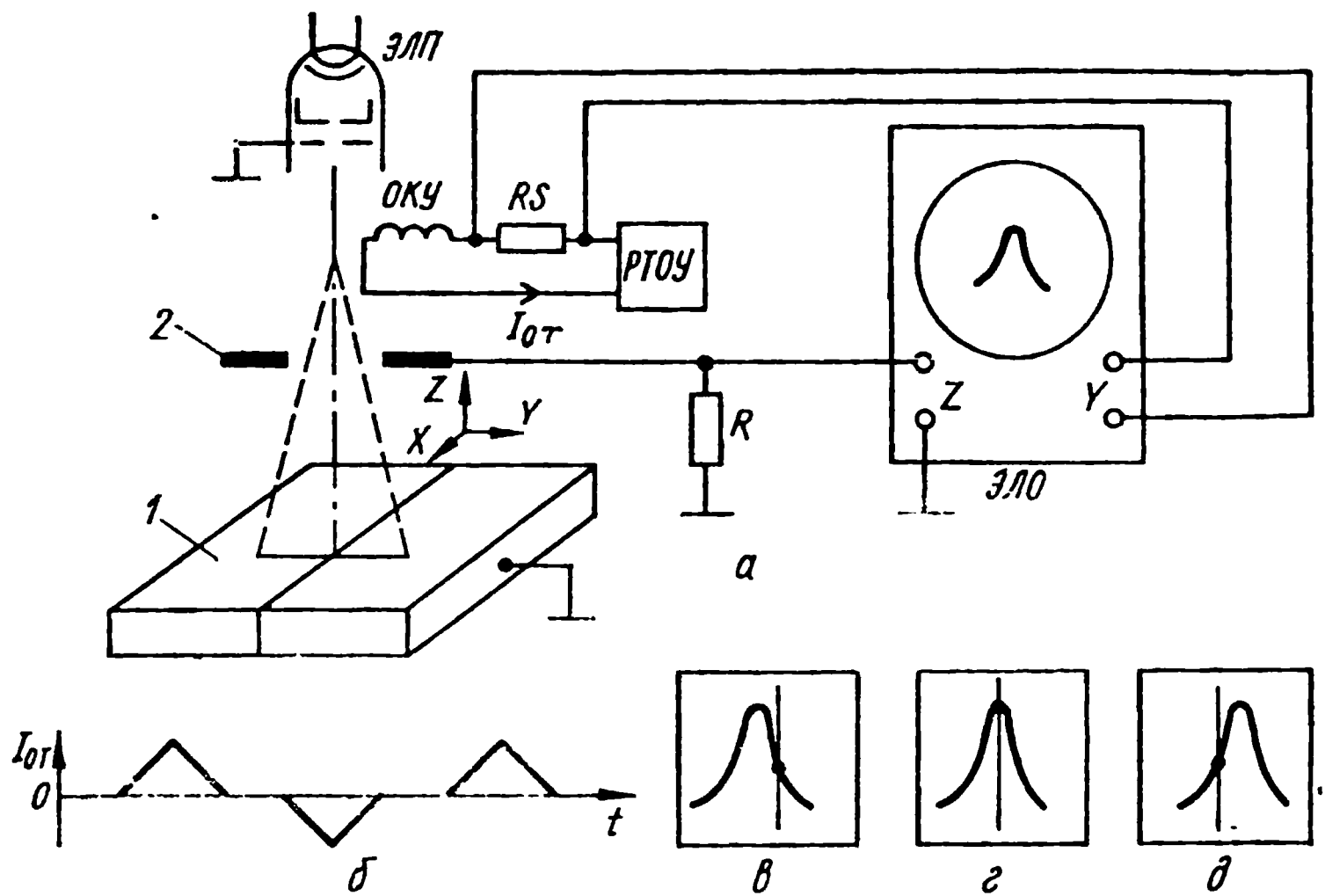


рис. 4.23. Система ручного наведения электронного луча на стык свариваемых деталей

снабжаются встроенными оптическими системами, расположенными коаксиально с осью пушки.

Для ручного или автоматического наведения электронного луча на стык свариваемых кромок применяются все системы, разработанные для дуговых методов сварки (см. § 2.7). Вместе с тем созданы системы слежения специально для ЭЛС, обладающие повышенной точностью. В них для зондирования стыка используется электронный луч.

При помощи электромагнитной системы электронный луч перемещается поперек свариваемого стыка. На торце электронно-лучевой пушки помещается специальный коллектор, собирающий вторичные электроны, которые образуются при воздействии сканирующего электронного луча на поверхность свариваемого изделия. При пересечении лучом стыка электронный ток на коллектор заметно падает. Критерий точного попадания луча на стык — минимальное значение тока в цепи нагрузки коллектора. Отличия различных систем наведения и слежения друг от друга заключаются в способе выделения из тока коллектора информации о взаимном расположении электронного луча и стыка, а также в способе выделения полезного сигнала на фоне помех.

Для *ручного наведения на стык электронного луча* перед сваркой используют системы типа «Рефлектрон», разработанные фирмой «Сиани». Система (рис. 4.23,а) работает следующим образом. Катушка ОКУ электромагнитного отклонения луча питается от регулятора тока отклонения РТОУ током  $I_{от}$ , изменение величины которого во времени показано на рис. 4.23,б. Напряжение, пропорциональное этому току, с резистора  $RS$  подается на вход  $Y$  горизонтального отклонения катодного осциллоскопа ЭЛО. Напряжение с резистора утечки



$R$  коллектора 2 подается на вход вертикального отклонения  $Z$  осциллоскопа. При изменении тока  $I_{от}$  во времени по закону треугольника (рис. 4.23, б) электронный луч линейно отклоняется поперек стыка, а луч осциллоскопа — по горизонтали. При пересечении лучом стыка деталей на экране осциллоскопа наблюдается колоколообразный импульс (рис. 4.23, в—д). В паузах между импульсами тока  $I_{от}$  электронный луч не отклонен, и неподвижный луч на экране осциллоскопа высвечивает яркое пятно. Взаимное расположение этого пятна и максимума импульса на экране осциллографа характеризует положение неотклоненного электронного луча относительно стыка свариваемых кромок. При точном совмещении луча со стыком яркое пятно совпадает с вершиной импульса вторичных электронов — рис. 4.23, г.

Для автоматического направления электронного луча по стыку необходимо получать информацию о величине и знаке отклонения луча относительно стыка в виде электрического сигнала. Сигнал рассогласования выделяют путем преобразования тем или иным способом в аналоговый или цифровой электрический сигнал, временных интервалов между импульсами тока коллектора и тока отклонения электронного луча [46]. Этот сигнал подается на исполнительный механизм взаимного перемещения луча относительно стыка. При этом возможны два способа использования сигналов рассогласования. При первом способе выполняется предварительный проход без сварки. Стык сканируется электронным лучом сварочной пушки с очень малым током (0,5—5 мА). Сигнал рассогласования записывается в запоминающем устройстве. Этот сигнал используется для коррекции предварительно занесенной в запоминающее устройство программы взаимного перемещения электронного луча и свариваемого изделия при ЭЛС стыков со сложным профилем. Таким образом, сварка выполняется без автоматического слежения — по предварительно скорректированной программе направления луча по стыку. Недостаток метода — невозможно скорректировать отклонения луча от стыка, появившиеся уже во время

сварки вследствие нагрева и деформации изделия.

При использовании второго способа сканирование стыка выпол-

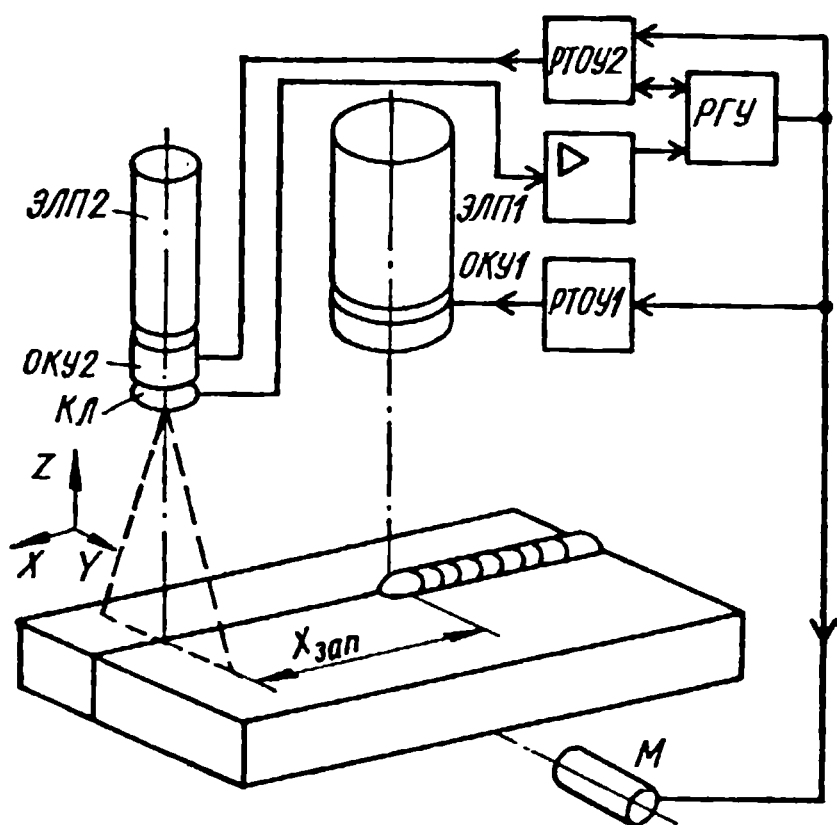


Рис. 4.24. Двухпушечная система автоматического слежения за стыком свариваемых деталей

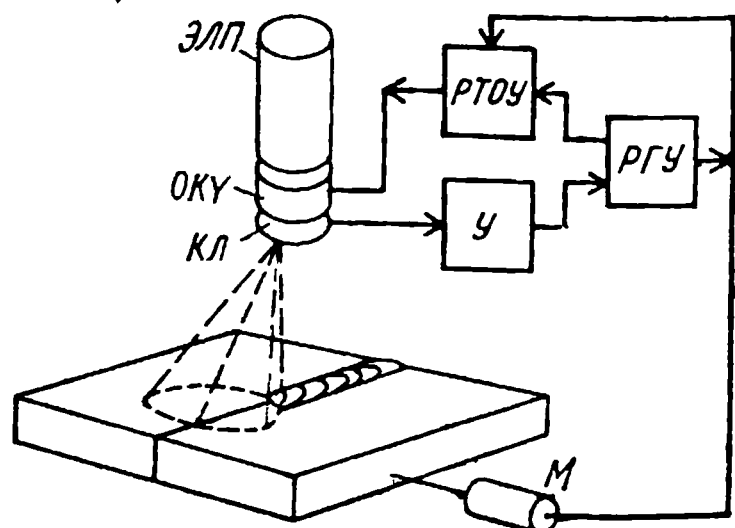


Рис. 4.25. Однопушечная система автоматического слежения за стыком свариваемых деталей

няется во время сварки. Для этой цели применяется дополнительная маломощная электронно-лучевая пушка либо сварочная пушка. Дополнительная пушка ЭЛП2 (рис. 4.24) зондирует стык впереди сварочной ванны на расстоянии  $X_{зап}$ . Расстояние выбирается из компромисса между защищенностью от помех на измерительный коллектор КЛ, создаваемых сварочной ванной, и допустимым транспортным запаздыванием системы слежения. Блок РГУ выделяет сигнал отклонения зондирующего электронного луча относительно стыка и преобразует его в управляющее напряжение, подаваемое на привод М перемещения свариваемого изделия поперек стыка. При ЭЛС тонких деталей и небольших рассогласованиях управляющий сигнал подается на системы электромагнитного отклонения ОКУ1 сварочной и зондирующей ОКУ2 пушки. Преимущество систем автоматического слежения за стыком с дополнительной ЭЛП — возможность работать с большой мощностью непрерывного сварочного электронного луча. Недостаток — необходимость в дополнительной ЭЛП.

В системах слежения с одной пушкой электронный луч периодически на короткое время выводится из зоны сварки для зондирования стыка (рис. 4.25). В однопушечной системе (в отличие от системы с дополнительной пушкой) луч отклоняется одновременно по двум координатам. В остальном системы, показанные на рис. 4.24 и рис. 4.25, принципиально не отличаются. Недостатком однопушечных систем слежения является ограниченная максимальная мощность сварочного луча — реально не более 5 кВт. Для работы с более мощными лучами сварочные установки необходимо комплектовать быстродействующими системами регулирования тока луча и тока фокусировки.

Преимущество всех систем слежения с вторично эмиссионными датчиками — их относительная простота и высокая точность слежения за стыком.

На практике при ЭЛС применяются также телевизионные системы автоматического слежения за стыком [44]. Они выполняют следующие функции: автоматическое обнаружение стыка; автоматическая коррекция положения сварочной ванны относительно стыка в процессе сварки; ведение сварочной ванны параллельно стыку или любой кромке изделия; дистанционная визуальная оценка качества сварного шва без изъятия изделия из вакуумной камеры; дистанционное измерение размеров сварочной ванны, стыка, шва и различных других деталей процесса перед сваркой, в процессе и после сварки.

Телевизионная система обеспечивает погрешность автоматической установки, сварочной ванны на стык и коррекцию сварочной ванны относительно стыка не более 0,5 мм при шероховатости поверхности заготовок и кромок  $R_a = 32$  мкм. Допустимая скорость поперечного ухода стыка не более 1 мм/с.

Технически телевизионные системы слежения довольно сложные, что объясняется сложностью обработки телевизионного сигнала и многообразием выполняемых ими функций. Эти системы применяются при ЭЛС малых толщин для изделий ответственного назначения.

## 4.7. Применение ЭВМ для управления процессом электронно-лучевой сварки

В связи с интенсивным развитием микропроцессорной техники локальные аналоговые регуляторы, рассмотренные в § 4.2 — 4.6, заменяются цифровыми. Устройства программного управления как отдельными параметрами ЭЛС, так и всей установкой и централизованного контроля ее работы уже в настоящее время выполняются цифровыми, часто на основе ЭВМ (см., например, блок БУИ на рис. 4.3).

Основные преимущества автоматических систем управления ЭЛС на базе ЭВМ по сравнению с ручным управлением и применением локальных аналоговых устройств управления:

1. Повышение точности задания и повторяемости режимов сварки вследствие цифровой формы задания режимов и координат сварного шва.

2. Возможность программного управления процессом: пуск, остановка, программное изменение режима во время сварки и т. п.

3. Легкость перестройки режимов и программ работы, которая сводится к простому выбору соответствующего номера программы из библиотеки программ, записанных в памяти машины.

4. Централизованный цифровой контроль технологических параметров, обеспечивающий переход от применения многочисленных параллельно работающих аналоговых показывающих приборов к ограниченному числу цифровых индикаторов и устройств сигнализации отклонений параметров от нормы.

5. Контроль состояния оборудования и прогнозирование надежности его работы. Эти данные позволяют избежать излишне частых профилактических осмотров оборудования и замены еще работоспособных катодов электронно-лучевых пушек, а также уменьшить вероятность отказов оборудования во время сварки, что могло бы привести к неисправимому браку изделия.

6. Адаптивное управление с расчетом коррекции уставок режима сварки для компенсации износа оборудования (изменение эмиттирующей способности катода, изменение геометрии оптики пушки после ее переборки или замены катода и т. п.), изменения напряжения сети, вакуума, температуры свариваемого изделия и т. п.

7. Расчет технико-экономических показателей процесса и автоматический выпуск технологической документации на выполняемый сварной шов.

8. Оптимизация процесса ЭЛС по качеству сварного соединения и производительности процесса.

9. Автоматический ввод данных о процессе в ЭВМ более высокого ранга (цеховые, общезаводские).

Структурная схема системы управления сварочной электронно-лучевой установкой с применением микроЭВМ приведена на рис. 4. 26. Система управления соответствует блоку БУИ (см. рис. 4.3). МикроЭВМ в данной системе работает в режиме супервизорного управления параметрами режима сварки, т. е. задает уставки, а локальные аналоговые регуляторы стабилизируют эти параметры. Помимо этого

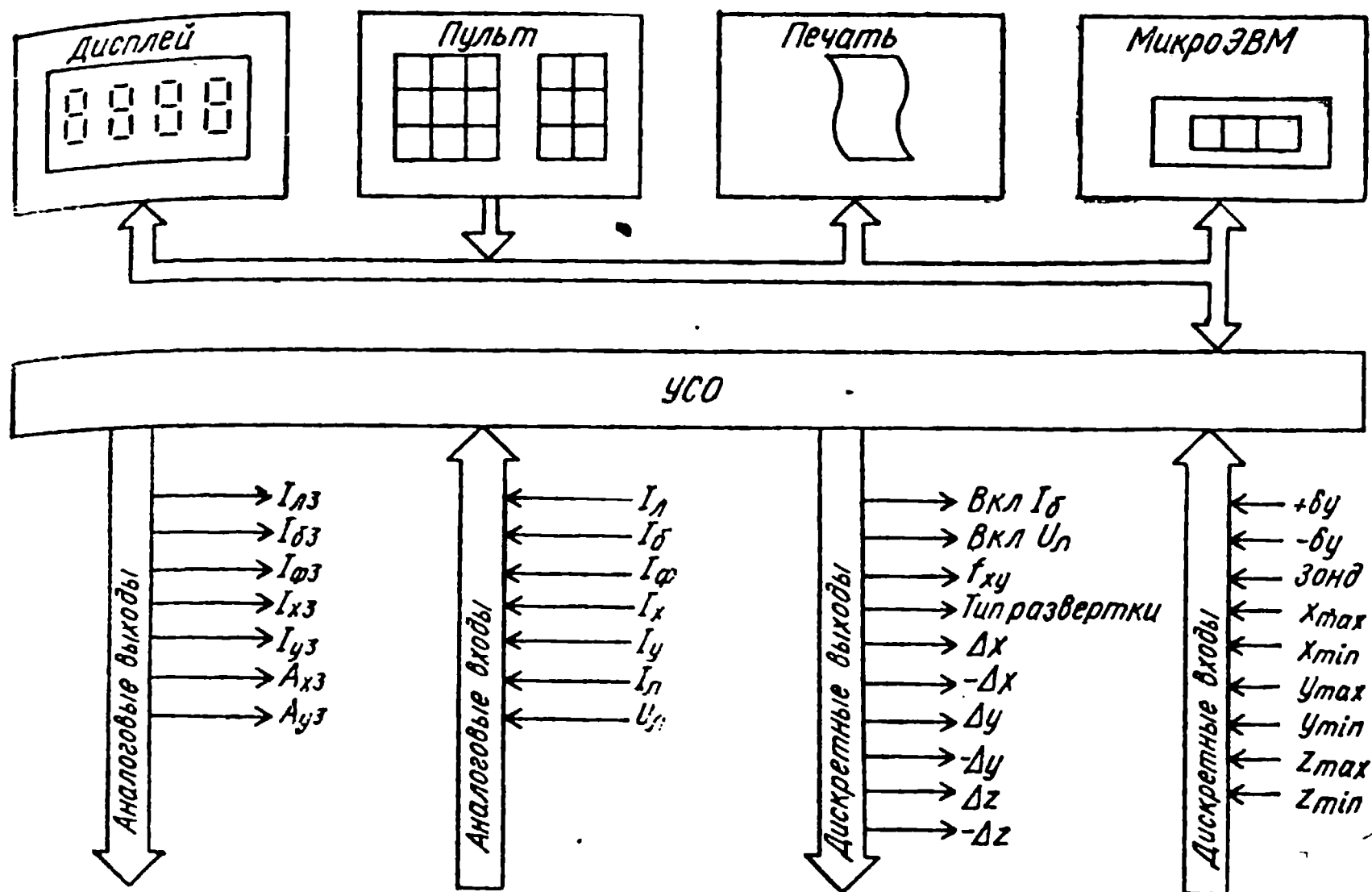


Рис. 4.26. Структурная схема системы управления электронно-лучевой сварочной установкой с применением микроЭВМ

ЭВМ осуществляет прямое цифровое управление исполнительными механизмами электронно-лучевой установки.

Система управления включает в себя микроЭВМ, пульт оператора-технолога, устройство отображения буквенно-цифровой информации (дисплей), печатающее устройство и устройство связи с объектом (УСО). В системе применена микроЭВМ «Электроника-60», хорошо приспособленная для использования в автоматических комплексах управления малой и средней сложности. Она имеет малые габариты (520 × 380 × 100 мм вместе с источником питания) при высокой производительности ( $\approx 250$  тыс. операций в секунду).

Пульт оператора представляет собой панель с набором клавиш и переключателей. Он позволяет вручную ввести в цифровом виде значение уставок параметров режима, координаты свариваемого стыка, оперативно проверить и изменить программу работы ЭВМ, осуществить пуск с любого участка программы, останов и т. п.

Оперативная информация о процессе, величины наиболее важных текущих параметров режима сварки отображаются на знаково-цифровом дисплее. По командам с пульта на дисплей можно ввести информацию о любых других параметрах установки или содержание любого участка памяти ЭВМ при проверке и оперативной корректировке программ работы системы.

Информация о процессе сварки регистрируется с помощью печатающего устройства. Печатается протокол процесса сварки: дата и время сварки, номер и тип изделия, фамилия оператора, параметры режима сварки, отклонения от нормального хода технологического процесса и т. п.

Устройство связи с объектом предназначено для двустороннего обмена информацией между сварочной установкой и микроЭВМ.

Цифровая ЭВМ — устройство дискретного действия, которое оперирует с двоичными переменными, имеющими одно из двух значений — 0 или 1. Любая информация в ЭВМ представлена в виде многоразрядного двоичного кода. Управляющие и контролируемые переменные в сварочной установке могут быть аналоговыми, цифровыми, частотными и т. п. УСО осуществляет преобразование аналоговой и дискретной информации, поступающей со сварочной установки, в двоичные коды, по командам ЭВМ выбирает нужный код и вводит его в ЭВМ. Кроме того, УСО принимает из ЭВМ управляющие коды, запоминает их, преобразует в электрические сигналы, пригодные для управления сварочной установкой, и подает на нужные исполнительные устройства.

В системе, показанной на рис. 4.26, используются только аналоговые и дискретные сигналы. На аналоговых выходах УСО формируются управляющие напряжения 0—10 В, используемые в качестве уставок локальных регуляторов параметров ЭЛС. В каждом из аналоговых выходных каналов содержится регистр, в котором запоминаются поступающие из ЭВМ управляющие коды. При помощи цифроаналоговых преобразователей эти коды преобразуются в пропорциональное или аналоговое напряжение. Дискретность изменения выходных аналоговых напряжений определяется разрядностью соответствующих двоичных кодов. Например, для восьмиразрядных двоичных кодов (8 бит) получаем 256 градаций выходного напряжения.

При помощи выходных аналоговых сигналов система управления обеспечивает задание и программное изменение следующих параметров:  $I_{л.з}$  — ток пучка; 8 бит ( $\Delta I_{л.з} = 4$  мА при максимальном токе 1024 мА);  $I_{б.з}$  — ток бомбардировки; 5 бит ( $\Delta I_{б.з} = 4$  мА при максимальном токе 128 мА);  $I_{ф.з}$  — ток фокусировки; 12 бит ( $\Delta I_{ф.з} = 0,5$  мА при максимальном токе 1024 мА);  $I_{отхз}$  — ток отклонения по координате  $x$ ; 8 бит;  $I_{отуз}$  — ток отклонения по  $y$ ; 8 бит;  $A_{xz}$  — амплитуда тока периодического отклонения по координате  $x$ ; 4 бит;  $A_{yz}$  — амплитуда тока периодического отклонения по координате  $y$ ; 4 бит.

Контролируемые аналоговые параметры ЭЛС установки поступают на аналоговые входы УСО, где они фильтруются и нормируются (приводятся к диапазону изменения 0—5 В) для согласования с параметрами аналого-цифрового преобразователя (АЦП). После нормирования входные сигналы по командам ЭВМ при помощи аналогового коммутатора по очереди подключаются ко входу АЦП. Выходной двоичный код АЦП, пропорциональный входному аналоговому напряжению, поступает для дальнейшей обработки в ЭВМ. Состав контролируемых аналоговых параметров показан на рис. 4.26.

Многие исполнительные устройства установки для ЭЛС требуют двухпозиционного регулирования: «больше—меньше», «включено—выключено» и т. п. Для этих устройств необходимы дискретные сигналы управления. Канал дискретных выходов УСО содержит регистры, в которых запоминается поступающая из ЭВМ информация двухпозиционного управления. Система управления формирует следующие управляющие дискретные сигналы (рис. 4.26): включение тока бомбардировки (Вкл $I_b$ ); включение ускоряющего напряжения (Вкл $U_a$ ); включение генератора периодической развертки



электронного пучка ( $f_{xy}$ ); выбор типа развертки периодического перемещения электронного пучка (тип развертки). Тип развертки задается четырехразрядным кодом, т. е. для этих целей используется четыре дискретных выхода. Четырехразрядный код позволяет задать один из 16 типов разверток; шаг перемещения по одной из координат вперед либо назад ( $\Delta x, -\Delta x; \Delta y, -\Delta y; \Delta z, -\Delta z$ ).

Управляющие дискретные сигналы подаются на соответствующие исполнительные устройства: регулятор тока бомбардировки, источник ускоряющего напряжения, генератор периодического отклонения электронного луча, блоки управления шаговыми двигателями перемещения изделия (электронно-лучевой пушки) по координатам  $x, y, z$ .

Дискретные сигналы датчиков сварочной электронно-лучевой установки поступают в канал дискретных входов УСО. Дискретные датчики формируют сигналы, имеющие два уровня — 0 или 1. Для контактов реле, концевых выключателей и т.п. это замыкание (1) или размыкание (0). Для датчиков с электрическим выходом — высокий (1) или низкий (0) уровень выходного напряжения. В системе управления, показанной на рис. 4.26, анализируются следующие дискретные сигналы: направление отклонений электронного луча от линии стыка свариваемых деталей  $\pm \delta_y$ , сигнал зондирования свариваемого стыка, состояние контактов концевых выключателей предельного перемещения изделия  $x_{\max}, x_{\min}, y_{\max}, y_{\min}, z_{\max}$  и  $z_{\min}$ .

**Функционирование системы управления.** Перед началом работы система управления (рис. 4.26) осуществляет автоматический самоконтроль, проверяя по тестовой программе исправность УСО, ЭВМ, цепей управления и контроля. Затем автоматически контролируется исправность сварочного оборудования: целостность нити накала электронно-лучевой пушки, исправность блока бомбардировки катода, эмиссионная способность катода, исправность фокусировки и отклонения электронного луча.

Точное совмещение электронного луча со свариваемым стыком — одна из проблем ЭЛС. При сварке по технологическим прихваткам и при косметической обработке расфокусированным электронным пучком для оплавления и сглаживания поверхности сварного шва невозможно применение устройств направления электронного луча по стыку, описанных в § 4.6. В этом случае применяют программное перемещение электронного луча по поверхности свариваемого изделия. Система управления совместно с датчиком положения электронного луча относительно свариваемого стыка позволяет автоматически формировать программу. Для этого выполняется предварительный обучающий проход свариваемого стыка при малом токе луча (1—2 мА) в режиме автоматического слежения за стыком. Система автоматически, через равные интервалы по длине шва определяет текущие координаты стыка. Чтобы не запоминать чрезмерно большое количество координат, весь стык автоматически разбивается на кусочно-линейные участки, аппроксимирующие с заданной точностью криволинейный стык. Для каждого участка достаточно занести в память ЭВМ координату лишь конца участка (узловой точки).



В дальнейшем в процессе сварки по координатам узловых точек ЭВМ подсчитывает координаты всех промежуточных точек при помощи линейной интерполяции. При сварке криволинейных швов система управления автоматически обеспечивает постоянную контурную скорость сварки, соответствующим образом корректируя скорость перемещения по координатам  $x$  и  $y$ .

Сравнительно большой объем оперативной памяти ЭВМ позволяет задавать программу изменения параметров режима сварки практически любой сложности. Одновременно осуществляется допусковый контроль всех параметров технологического режима сварки.

Режим работы системы управления (обучающий проход, выполнение технологических прихваток, косметический проход) задается оператором с пульта управления набором номера соответствующей программы.

На рис. 4.26 приведена простейшая система автоматического управления электронно-лучевой сварочной установкой. Эта система содержит минимум оборудования и хорошо приспособлена для производственных условий. Если документировать не нужно, то можно исключить и печатающее устройство. Программы работы записываются в постоянное запоминающее устройство системы на другом оборудовании либо с помощью устройства ввода с перфоленки (магнитной ленты), временно подключаемого для этой цели к ЭВМ. Большие возможности и гибкость работы обеспечивают универсальные управляющие миниЭВМ с расширенным комплектом периферийного оборудования: магнитной памятью на гибких дисках, быстродействующим печатающим широкоформатным устройством, устройством ввода с перфоленки, устройством вывода на перфоленку, видеоконтрольным устройством ввода и вывода информации и т. п. Помимо управления ЭВМ позволяют эффективно отлаживать и редактировать управляющие программы, но ввиду сложности оборудования требуют специального обслуживающего персонала и менее надежны в эксплуатации, особенно в условиях сварочного цеха.

## 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

### 5.1. Контактная точечная (шовная) сварка как объект автоматического управления

Объект автоматического управления при контактной сварке — технологический процесс, который характеризуется электрическими и тепловыми полями, а также пластическими деформациями в зоне сварки.

Управляющие и возмущающие воздействия, определяющие формирование сварного соединения, прикладываются к сварочной машине и непосредственно к зоне сварки. Основные параметры процесса точечной (шовной) сварки: сварочный ток  $I_{св}$ ; время сварки  $t_{св}$ , а для шовной сварки время импульса  $t_{и}$  и время паузы  $t_{п}$  между импульсами сварочного тока; усилие сжатия  $F_{сж}$  электродов; размеры рабочей поверхности электродов и роликов; для шовной сварки режим характеризуется скоростью перемещения  $V_{св}$  свариваемых деталей.

Обеспечение необходимого уровня показателей качества сварных соединений и прежде всего их прочности требует задания и поддержания установленных значений большинства параметров сварочного режима с точностью не менее  $\pm 5\%$ . Так, снижение  $I_{св}$  на  $10\%$  может привести к уменьшению диаметра ядра и, соответственно, прочности соединений при сварке сталей на  $20\text{—}25\%$  от номинального значения. Такие же параметры, как сварочное и ковочное усилия сжатия электродов, допускают изменение в пределах  $10\text{—}15\%$  от номинальных значений без существенного ухудшения качества сварных соединений.

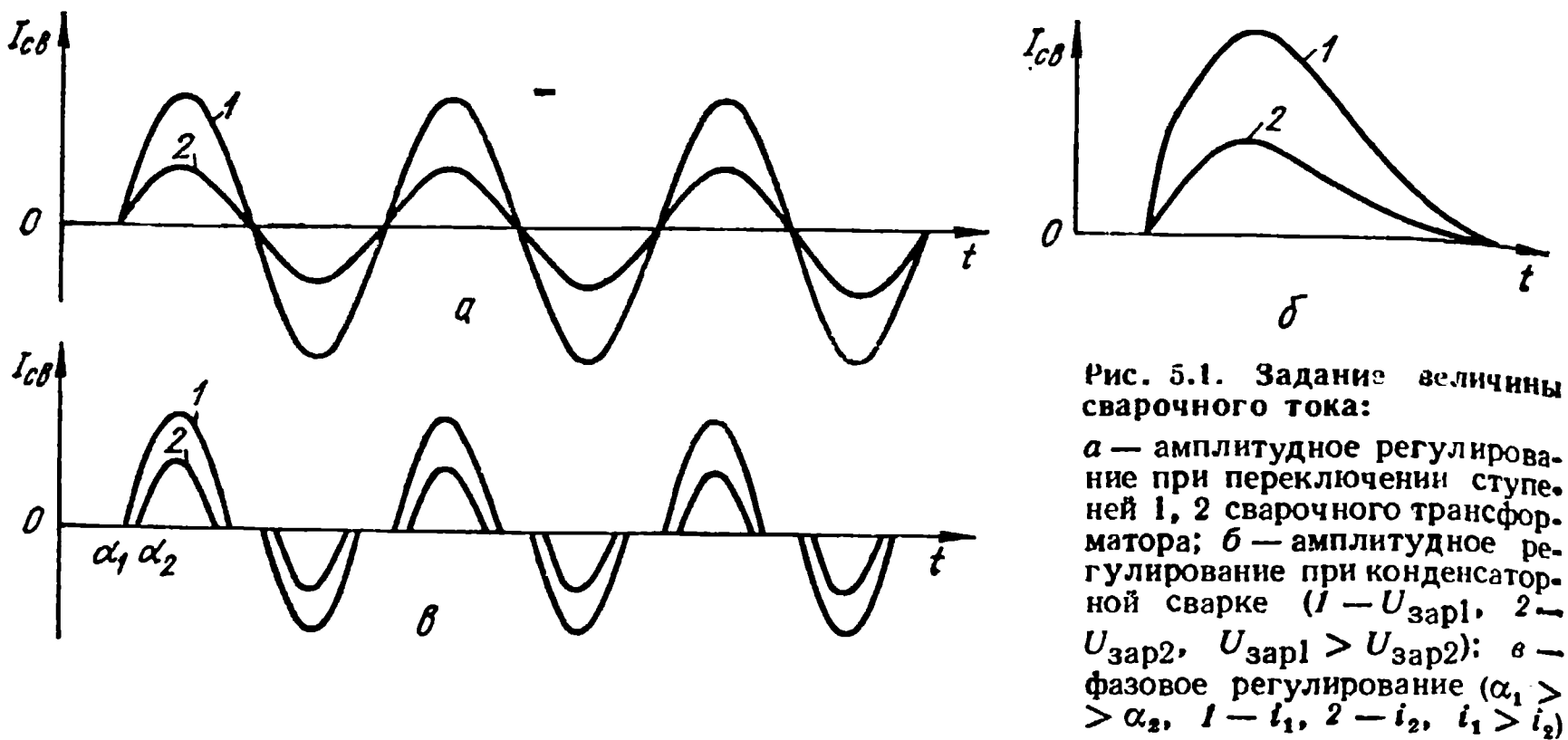
Сварочный ток  $I_{св}$  — один из основных параметров, определяющих режим сварки и качество сварного шва. Способ амплитудного задания и регулирования  $I_{св}$  заключается в изменении его действующего значения при переключении ступеней сварочного трансформатора или изменении напряжения зарядки  $U_{зар}$  батареи конденсаторов — при конденсаторной сварке (рис. 5.1, а, б).

Наибольшее распространение получил способ фазового регулирования действующего значения тока при изменении фазы включения вентильного (тиристорного) контактора (рис. 5.1, в).

Время сварки  $t_{св}$  в сварочных машинах переменного тока задают при включении вентильного (тиристорного или игнитронного) контактора на требуемое время, кратное числу периодов питающей сети (рис. 5.2, а).

При однополупериодной сварке продолжительность импульса  $I_{св}$  можно регулировать изменением фазы напряжения, управляющего включением вентиля (рис. 5.2, б). При конденсаторной сварке длительность импульса тока зависит от емкости  $C_{зар}$  и коэффициента трансформации сварочного трансформатора  $K$  (рис. 5.2, в, г).

Усилие сжатия  $F_{сж}$  электродов при механическом приводе задается грузами или пружинами и системами рычагов, а при пневматиче-



ском и пневмогидравлическом приводах регулируется редукторами давления. Если сварочная машина имеет электромагнитный привод сжатия, то  $F_{сж}$  определяется током в обмотке электромагнита. С позиций автоматизации наиболее удобным является электромагнитный привод, применяемый только для машин малой мощности.

Чаще всего применяют ступенчатое регулирование давления в пневматическом или пневмогидравлическом приводе, обеспечивая необходимый цикл предварительного сжатия деталей  $t_1 - t_2$  (рис. 5.3), сжатия в процессе прохождения сварочного тока  $t_2 - t_3$  и повышенного усилия сжатия во времяковки  $t_3 - t_4$ . Такой цикл задается включением в моменты времени  $t_1 - t_4$  электропневмоклапанов, обеспечивающих подачу воздуха в определенные камеры привода сжатия.

Размеры рабочей поверхности электродов (их диаметр при точечной сварке, радиус заточки и ширина рабочей поверхности роликов при шовной сварке) существенно влияют на размеры сварного шва и задаются перед сваркой.

Задание и стабилизация управляющих воздействий с требуемой точностью еще не гарантирует получение сварных соединений с необ-

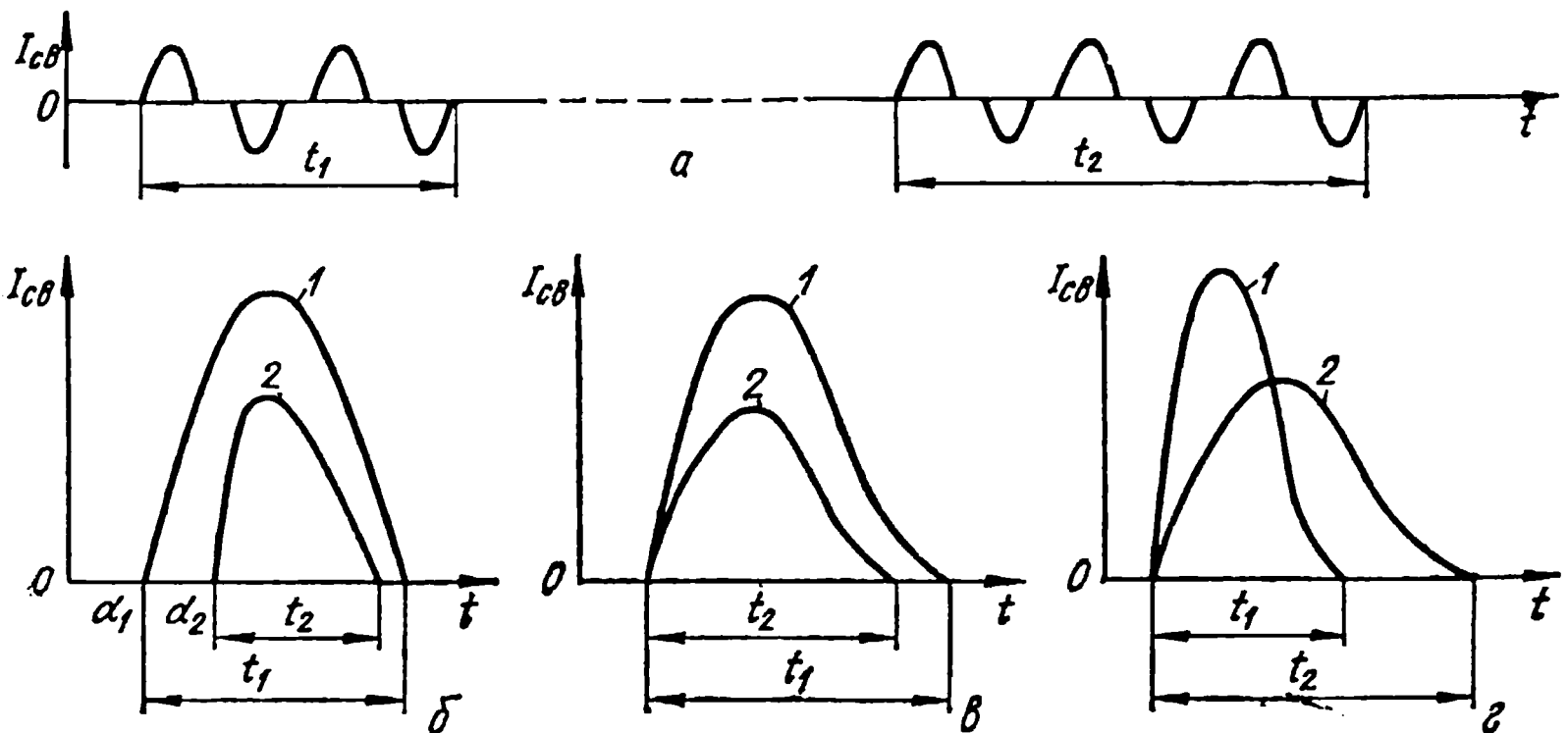


Рис. 5.2. Задание времени сварки:  
*a* — при сварке на переменном токе ( $t_2 > t_1$ ); *б* — при однополупериодной сварке (1 —  $\alpha_1$ , 2 —  $\alpha_2$ ,  $\alpha_1 > \alpha_2$ ,  $t_1 > t_2$ ); *в* — при изменении зарядной емкости (1 —  $C_1$ , 2 —  $C_2$ ,  $C_1 > C_2$ ,  $t_1 > t_2$ ); *г* — при изменении коэффициента трансформации (1 —  $k_1$ , 2 —  $k_2$ ,  $k_2 > k_1$ ,  $t_2 > t_1$ )

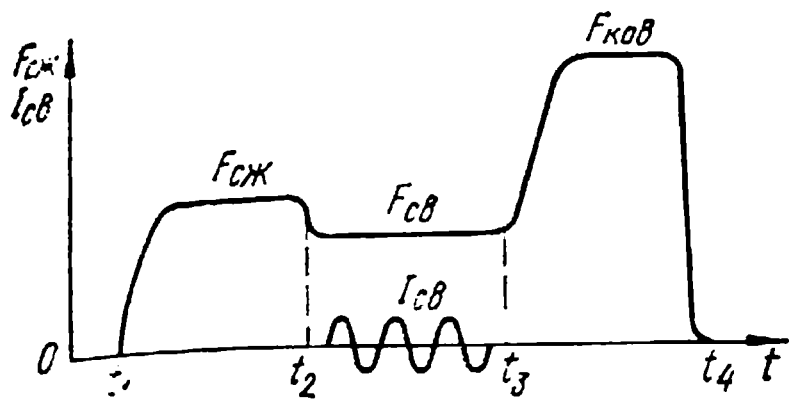
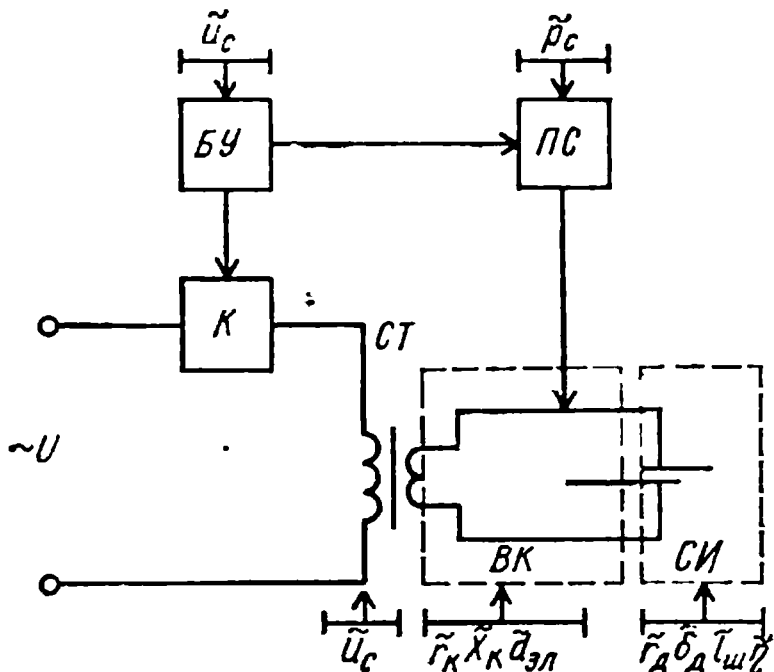


Рис. 5.3. Циклограмма работы сварочной машины

Рис. 5.4. Возмущающие воздействия при сварке: К — контактор; БУ — блок управления; СТ — сварочный трансформатор; ПС — привод сжатия; ВК — вторичный контур; СИ — свариваемое изделие



ходимыми прочностными характеристиками, так как в результате влияния различных возмущений процесс сварки протекает в условиях, отличных от номинальных (рис. 5.4).

На сварочную машину, включая тиристорный контактор и регулятор цикла сварки, действуют следующие возмущения: колебания напряжения питающей сети  $\tilde{u}_c$ ; изменение сопротивления контура машины (активного  $R_k$  и индуктивного  $\tilde{x}_k = \omega L$ ); изменение усилия сжатия электродов, вследствие изменений давления в воздушной сети  $\tilde{p}_c$  или сил трения в приводе сжатия; изменение геометрических размеров рабочей поверхности электродов (диаметра электрода при точечной сварке  $d_{эл}$  и ширины ролика при шовной сварке), а также изменение скорости при шовной сварке. К возмущениям, воздействующим непосредственно на сварное соединение, относятся: изменения толщины или других размеров свариваемых деталей  $\tilde{\delta}_d$ , сопротивления контакта деталь — деталь  $\tilde{r}_d$  вследствие наличия различных оксидных пленок и окалины; шунтирование сварочного тока ранее сваренными точками в зависимости от величины шага  $\tilde{l}_{ш}$  между ними или случайными контактами вследствие неровностей свариваемых листов  $\tilde{\eta}$  и т. п.

Кроме перечисленных возмущений возможны и другие, которые в связи с незначительной величиной в меньшей степени влияют на процесс (например, изменение теплофизических свойств и химического состава металла, изменение режима охлаждения электродов и т. п.).

Возмущения, оказывая различное влияние на отдельные этапы процесса сварки, параметры режима и работу сварочной машины, приводят к нарушению условий образования сварного соединения и ухудшению его качества.

Колебания напряжения питающей сети — возмущение, действующее на сварочную машину. В соответствии с законом Джоуля — Ленца количество тепла  $Q$ , выделяющееся при контактной точечной (шовной) сварке,

$$Q = k \int_0^{t_{св}} \frac{u_{эл}^2(t)}{r(t)} dt, \quad (5.1)$$

где  $r(t)$  — сопротивление зоны сварки;  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $u_{эл}(t)$  — величина межэлектродного напряжения, измене-

ние которой непосредственно связано с колебаниями сетевого напряжения  $u_c$ . Наиболее опасным является уменьшение напряжения питания, приводящее к непровару и соответствующей потере прочности сварной точки. При повышении напряжения  $U_c$  могут возникать выплески жидкого металла, прожоги и т. п. Напряжение  $U_c$  в течение суток может изменяться как плавно, так и скачкообразно при подключении мощных потребителей энергии. Кратковременные изменения напряжения могут достигать от  $-25\%$  до  $+15\%$   $U_{c,ном}$ . Эти изменения существенно влияют на процесс сварки и могут в значительной степени снизить качество выполняемых сварных соединений. Кроме того, колебания  $u_c$  влияют на стабильность работы блоков управления, что приводит к нарушению заданного цикла сварки.

*Изменение сопротивления вторичного контура сварочной машины* (активного и индуктивного) в процессе сварки или в течение смены приводит к изменению сварочного тока и выделяющейся в зоне сварки энергии, что влияет на качество сварки. Изменение активного сопротивления обусловлено нагревом и износом токоведущих частей сварочного контура, ослаблением или окислением контактов, особенно в местах болтовых соединений, а также скользящих контактов в шовных машинах. Индуктивное сопротивление контура увеличивается вследствие введения в этот контур значительных ферромагнитных масс.

При введении в контур машины ферромагнитных масс увеличивается индуктивное и активное, а следовательно, и полное сопротивление контура. Это объясняется увеличением активных потерь на гистерезис и вихревые токи. Особенно значительное увеличение сопротивления контура, а следовательно, уменьшение тока наблюдается при сварке изделий, которые надевают на хобот машины, например при сварке обечаек из ферромагнитных материалов. Изменение активного и индуктивного сопротивлений контактных машин — одно из наиболее опасных возмущающих воздействий, часто встречающихся в производственных условиях.

*Изменение усилия сжатия электродов* в сварочных машинах, имеющих пневматический и пневмогидравлический привод сжатия, зависит от колебаний давления в пневмосистеме и влияет на сопротивление свариваемых деталей и на пластическую деформацию металла в зоне сварки. При повышении давления увеличивается площадь соприкосновения электрода с деталью, что влечет за собой уменьшение плотности тока и приводит к непровару. Снижение давления сопровождается увеличением сопротивления зоны сварки и, как следствие, повышением вероятности появления выплесков и разбросом прочностных свойств соединения.

Существенным возмущающим воздействием, влияющим на усилие сжатия электродов, является изменение силы трения в подвижных частях привода сжатия вследствие износа механизмов при отсутствии профилактики и ремонта. Чаще всего это приводит к уменьшению усилия сжатия на электродах.

*Изменение геометрических размеров рабочей поверхности электродов* происходит вследствие естественного износа электродов. Степень износа зависит от многих факторов: режима сварки; свариваемого материала; чистоты его поверхности; интенсивности охлаждения; стой-

кости материала, из которого изготовлены электроды и т. п. В результате износа электродов увеличивается площадь контактной поверхности, уменьшаются плотность тока и размеры литого ядра, что приводит к непровару.

*Изменение сопротивления свариваемых деталей* вследствие отклонений в условиях обработки их поверхностей может происходить от образца к образцу и от одной партии изделий к другой. Особенно это заметно на материалах, покрытых окалиной или оксидными пленками, которые не удаляются перед сваркой. Сопротивление свариваемых деталей может изменяться также вследствие изменения толщины листов или диаметра круглых заготовок, например прутков или проволоки. Разброс значений сопротивления деталей приводит к изменению тепловыделения в зоне сварки, и как вследствие, значительному разбросу прочностных характеристик сварных швов.

*Шунтирование сварочного тока* наблюдается прежде всего при последовательной постановке точек. В этих условиях величина тока, протекающего через свариваемую точку, может изменяться вследствие ответвления некоторой части тока через ранее сваренные точки. Кроме того, ответвление тока может происходить через контакты, образуемые, например, неровностями поверхности свариваемых листов.

Суммарное значение тока во вторичном контуре изменяется вследствие шунтирования незначительно, однако сварочный ток, протекающий непосредственно через свариваемую точку, может снижаться до недопустимого уровня. С увеличением толщины деталей и уменьшением отношения шага точек и их диаметру степень шунтирования возрастает.

Анализ основных возмущений при точечной (шовной) сварке показывает, что качество сварки и ее основной показатель — прочность сварного шва — могут значительно снизиться при действии возмущений на сварочную машину и зону сварки. При относительно малом значении отдельных возмущений одновременное воздействие на объект в случае их неблагоприятного сочетания также может привести к недопустимому снижению качества сварки. Этим можно объяснить периодическое появление дефектных соединений даже при строгом соблюдении технологии сварки.

Степень влияния и вероятность проявления рассмотренных возмущений различны и могут по-разному отражаться на качестве сварных соединений в зависимости от условий сварки, строгости соблюдения технологической дисциплины, степени износа оборудования и т. п. Так, наиболее часто встречающимся и трудно устранимым возмущением является колебание напряжения сети, в то время как изменения сопротивления сварочного контура при надлежащей эксплуатации оборудования и при сварке немагнитных материалов могут быть практически устранены.

Количественная оценка степени влияния на качество сварки различных возмущений и любых других параметров, которые поддаются измерению или расчету в процессе сварки, может быть дана на основе экспериментально-статистических данных с использованием метода дисперсионного анализа. Так, была проведена оценка влияния некото-



рых параметров на один из показателей качества сварки — диаметр ядра точки при точечной сварке образцов из сплава АМг6М и нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной  $1 + 1$  мм [27]. Сварка производилась на низкочастотной машине униполярным импульсом тока. Режим сварки устанавливался исходя из общих рекомендаций по сварке данных материалов. При этом обеспечивалось получение диаметра ядра точки  $d_{\text{я}} = (3 \div 4)\delta$ , где  $\delta$  — толщина образца, мм. Регистрировались следующие параметры:

1) амплитудное значение импульса сварочного тока  $I_{\text{св}}$ ; среднее значение падения напряжения между электродами  $U_{\text{эл}} = \frac{1}{t_{\text{св}}} \int_0^{t_{\text{св}}} u_{\text{эл}} dt$ ,

где  $t_{\text{св}}$  — время сварки,  $u_{\text{эл}}$  — мгновенное значение падения напряжения на электродах;

2) относительное изменение сопротивления сварочного контакта и среднее значение сопротивления сварочного контакта за последний период импульса тока:

$$\Delta R_{\text{э}} = \frac{R_{\text{н}} - R_{\text{к}}}{R_{\text{н}}}; \quad R_{\text{э}} = \frac{1}{t_{\text{св}}} \int_{t_{k-1}}^{t_{\text{к}}} \frac{u_{\text{эл}}}{i_{\text{св}}} dt,$$

где  $R_{\text{н}}$  — начальное значение сопротивления зоны сварки через 10 мс после включения сварочного тока;  $R_{\text{к}}$  — сопротивление в момент окончания сварки;  $k$  — количество периодов промышленной частоты в импульсе сварочного тока;  $i_{\text{св}}$  — мгновенное значение сварочного тока;

3) средняя мощность  $Q$  в сварочном контакте и энергия  $E$ , затраченная на формирование соединения:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{св}}} \int_0^{t_{\text{св}}} u_{\text{эл}} i_{\text{св}} dt; \quad E = \int_0^{t_{\text{св}}} u_{\text{эл}} i_{\text{св}} dt.$$

Было сварено около 100 образцов, при этом сварочный ток изменялся на  $(+5 \div -15 \%) I_{\text{ном}}$ , а усилие сжатия на  $\pm 15 \%$   $F_{\text{ном}}$ .

В процессе обработки данных вычислялась общая дисперсия  $s_0^2$  выходного показателя — диаметра  $d_{\text{я}}$ . Для оценки влияния каждого контролируемого параметра на  $s_0^2$  необходимо ее разложить на составляющие, одна из которых  $s_i^2$  характеризует дисперсию  $d_{\text{я}}$ , связанную с измеряемым параметром  $I_{\text{св}}$ , а другая  $s_{\text{ост}}^2$  — дисперсию  $d_{\text{я}}$ , обусловливаемую всеми остальными факторами.

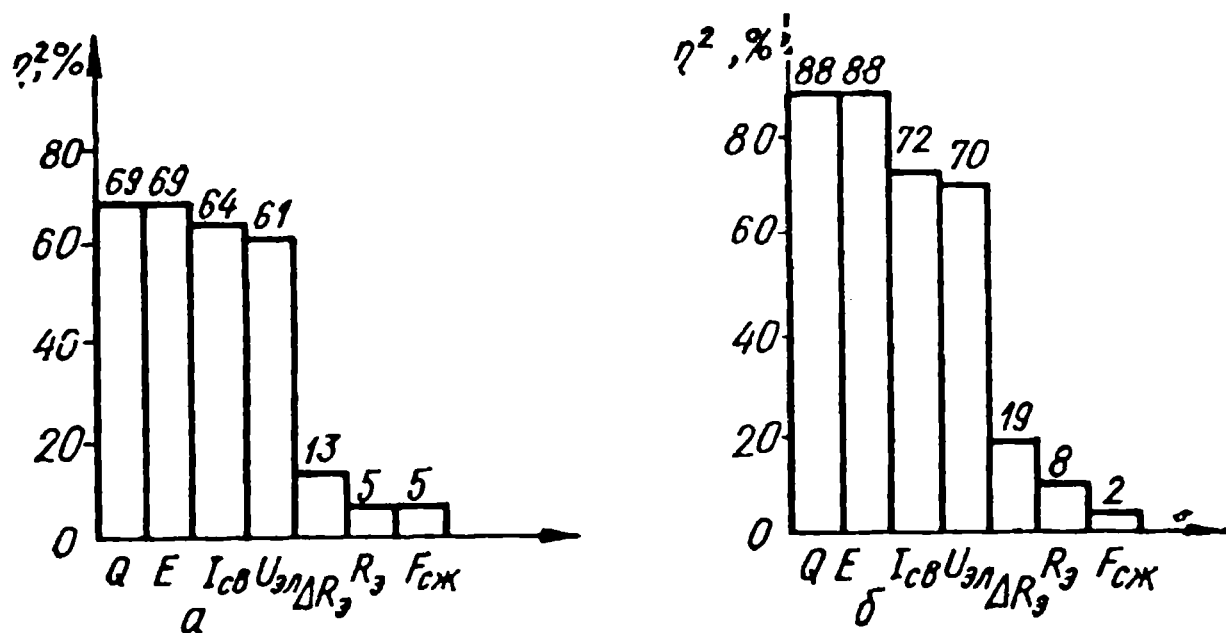
Величина  $s_i^2 = s_0^2 - s_{\text{ост}}^2$ , а  $s_0^2$  и  $s_{\text{ост}}^2$  находят при расчете уравнений регрессии  $d_{\text{я}} = f(x_i)$ , где  $x_i$  — каждый контролируемый параметр.

Для оценки степени связи каждой из выбранных переменных с показателем качества используется квадрат корреляционного отношения (в %):

$$\eta^2 = (s_i^2/s_0^2) 100.$$

Рис. 5.5. Диаграммы корреляционной связи различных параметров с диаметром ядра:

а — для сплава АМгбМ;  
б — для стали 12Х18Н10Т



На рис. 5.5 приведены результаты оценки по показателю  $\eta^2$  влияния ряда определяющих параметров процесса контактной сварки на диаметр ядра сварной точки. Как следует из рис. 5.5, ни один из отдельно взятых параметров не отражает в достаточной степени процесс образования ядра сварной точки. Наибольший вклад в формирование ядра вносят мощность  $Q$  и энергия  $E$ . При сварке легких сплавов типа АМгбМ величина связи энергетических параметров с размерами ядра точки выражена слабее ( $\eta^2 = 69\%$ ), чем при сварке нержавеющей стали ( $\eta^2 = 88\%$ ).

Следовательно, управление по энергетическим параметрам наиболее эффективно при сварке нержавеющей сталей. Незначительное влияние усилия сжатия  $F_{сж}$  на величину  $d_{я}$  подтверждается практическим опытом, свидетельствующим о том, что изменения усилия сжатия в пределах  $\pm 15\%$  от номинального не влияют на качество соединения, если сварка выполняется на оптимальном режиме. Относительное изменение сопротивления ( $\Delta R_z = (R_n - R_k) / R_n$ ) и среднее значение сопротивления  $R_z$  за последний период сварочного импульса слабо коррелированы с размерами ядра.

Системы автоматического контроля и регулирования на основе модели, использующей информацию об одном электрическом параметре, не позволяют с необходимой точностью решать поставленные задачи. Это вынуждает разрабатывать многофакторные модели процесса, в которые входили бы одновременно различные параметры режима и процесса сварки.

Для предупреждения вредного влияния возмущений на качество сварных соединений широко применяют методы и устройства автоматического регулирования. Основная задача регуляторов — стабилизация параметров режима сварки либо их изменение по программе, обеспечивающей протекание процесса в оптимальных условиях.

Создание САР точечной и шовной сварки связано с некоторыми трудностями, главная из которых — невозможность непосредственного измерения в процессе сварки основного показателя качества: диаметра  $d_{я}$  ядра точки. Кроме того, трудности возникают из-за особенностей процесса сварки: кратковременности и прерывистого характера сварочного процесса; высоких энергетических параметров оборудования; сильных помех, создаваемых мощными электромагнитными полями сварочного контура.

Быстродействие — важнейшее требование к регуляторам процессов контактной сварки, поскольку в течение короткого промежутка времени (порядка  $10^{-2}$  с) должны быть осуществлены операции измерения регулируемой величины, сравнения ее с заданным значением и выработки управляющего воздействия. Требуемое быстродействие и точность могут быть обеспечены только на основе использования достижений современной электронной и микропроцессорной техники.

## 5.2. Состав и основные устройства систем автоматического управления процессом точечной и шовной сварки

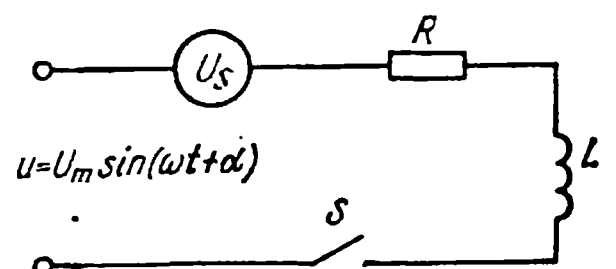
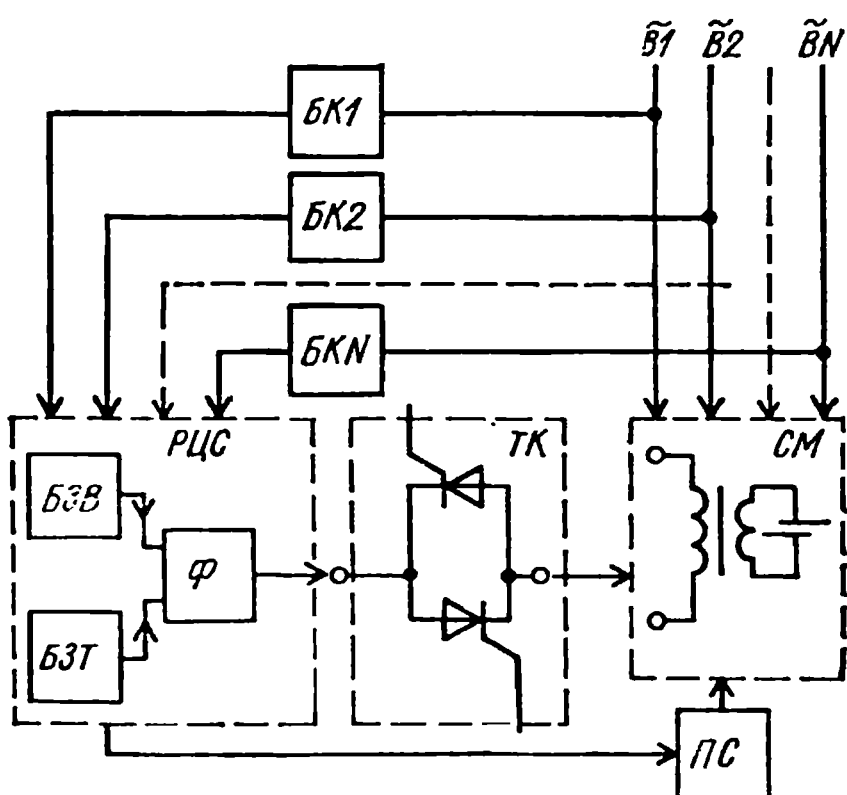
В контактной сварке наиболее распространены разомкнутые системы программного управления и систем управления по возмущению (системы компенсации).

Система программного управления (СПУ) состоит из следующих основных компонентов (рис. 5.6): устройства для задания цикла сварки *РЦС* и исполнительных устройств — тиристорного контактора *ТК*, включающего трансформатор сварочной машины *СМ*, и привода подвижного электрода — привода сжатия *ПС* с аппаратурой управления. Устройства для задания цикла сварки называют регуляторами цикла сварки *РЦС* или регуляторами времени *РВ*, хотя по существу они являются задатчиками тока и времени. В состав *РЦС* входят блоки задания времени *БЗВ*, тока *БЗТ* и фазовращатель *Ф*. *РЦС*, воздействуя на *ТК*, обеспечивает включение и выключение трансформатора сварочной машины *СМ*. Рассматриваемая система обеспечивает жесткое программирование временных интервалов цикла, сварки, величин тока сварки, подогрева и отжига, а также управление работой привода сжатия *ПС* сварочной машины. Основное преимущество разомкнутых систем управления — простота и быстродействие применяемой в них аппаратуры. Широкое распространение получили простейшие системы с *РЦС*, обеспечивающим задание постоянных значений времени и тока сварки. Если необходима модуляция сварочного тока, то применяют системы, позволяющие осуществить плавное нарастание тока. Наиболее совершенные из разомкнутых СПУ

позволяют изменять сварочный ток по программе, обеспечивающей получение высококачественных соединений. В этих системах в качестве *БЗТ* используются программирующие устройства.

Рис. 5.6. Система разомкнутого управления и автоматической компенсации

Рис. 5.7. Схема замещения сварочной машины



В конденсаторных машинах система управления состоит из блока, обеспечивающего зарядку конденсаторной батареи до требуемого напряжения и тиристорного ключа для разрядки конденсаторов на сварочный трансформатор.

Недостаток разомкнутых СПУ — независимость управляющих воздействий от фактического состояния сварочного процесса, поскольку возмущения  $\tilde{B}I—\tilde{B}N$ , возникновение и действие которых нельзя заранее предусмотреть, не учитываются в законе управления.

Устранение указанного недостатка обеспечивается в разомкнутых системах с регулированием по возмущению (системах компенсации), которые наряду с рассмотренными блоками *РЦС*, *ТК*, *ПС* содержат блоки компенсации *БК1—БК<sub>n</sub>* (рис. 5.6), предназначенные для измерения наиболее существенных возмущений и формирования дополнительных компенсирующих воздействий, которые на входе фазовращателя суммируются с воздействиями от *БЗВ* и *БЗТ*. Тогда результирующее управляющее напряжение на входе фазовращателя, определяющее угол включения  $\alpha$  тиристорного контактора *ТК*,

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}0} \pm \sum_{i=1}^n k_i \Delta u_{\text{вх} k_i}, \quad (5.2)$$

где  $U_{\text{вх}0}$  — напряжение от блоков *БЗТ* и *БЗВ*;  $\Delta u_{\text{вх} k_i}$  — напряжение компенсации с блока *БК<sub>i</sub>*;  $k_i$  — коэффициент пропорциональности;  $n$  — количество учитываемых возмущающих воздействий.

При правильном выборе знака и значения коэффициентов пропорциональности в уравнении (5.2) угол  $\alpha$  изменится таким образом, что влияние возмущений на режим сварки окажется скомпенсированным. Для достижения полной компенсации возмущений необходимо выбрать коэффициенты  $k_i$ , учитывая нелинейный характер зависимости  $I_{\text{св}} = f(\alpha)$ . Наиболее успешно эту задачу можно решить на основе применения микропроцессорной техники.

При проектировании системы автоматического управления с тиристорным контактором в качестве исполнительного устройства первоочередной задачей является определение регулировочной характеристики, устанавливающей связь между действующим значением сварочного тока  $I_{\text{эф}}$  и углом включения тиристорных при различных  $\cos \varphi$ . Для этого рассмотрим схему замещения сварочной машины совместно с тиристорным контактором (рис. 5.7), при построении которой приняты следующие обозначения:  $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$  — напряжение источника питания (сети переменного тока);  $\alpha$  — угол включения тиристора;  $R$ ,  $L$  — приведенные к первичной обмотке трансформатора машины *СМ* активное сопротивление и индуктивность;  $S$  — встречно-параллельно включенные тиристоры;  $U_s$  — падение напряжения на тиристорах. Электрические процессы, происходящие в такой цепи, описывают уравнением

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = iR + L \frac{di}{dt} + U_s. \quad (5.3)$$

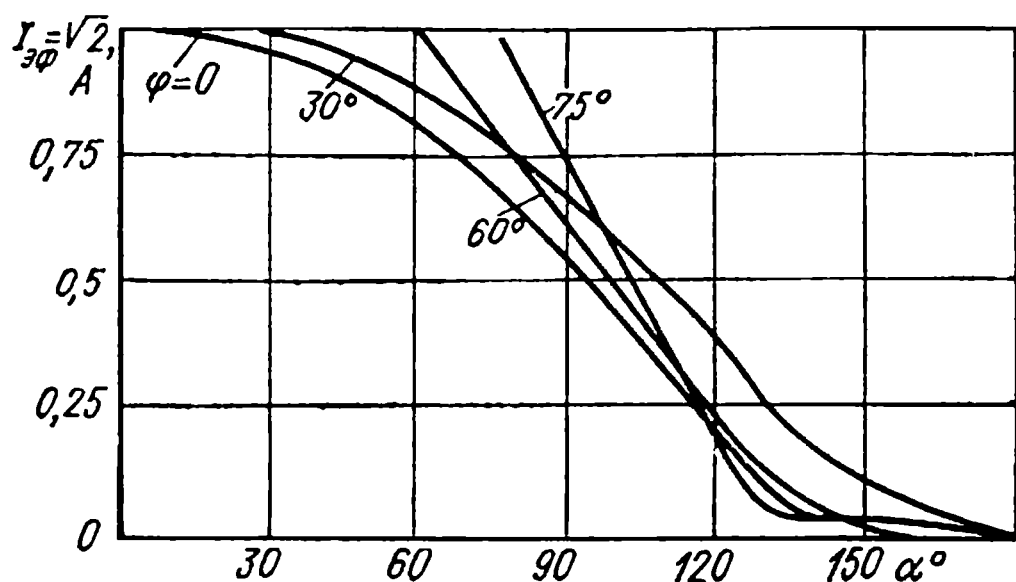


Рис. 5.8. Регулировочные характеристики сварочной машины

Пренебрегая падением напряжения  $U_s$ , ввиду его малости, получим решение уравнения (5.3) в относительных величинах:

$$i' = \sin(\theta + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\theta \operatorname{ctg} \varphi}, \quad (5.4)$$

где  $i' = \frac{i}{I_m}$ ;  $I_m = \frac{U_m}{Z}$ ;  $\theta = \omega t$ ;  $\operatorname{ctg} \varphi = \frac{R}{\omega L}$ .

В момент естественного отключения тиристором ток  $i' = 0$ , а длительность его протекания зависит от значения  $\lambda = \alpha_n - \alpha$ , где  $\alpha_n$  — угол выключения тиристора. Величина  $\lambda$  определяется из уравнения (5.4), если принять  $i' = 0$ ,  $\theta = \alpha_n$ . При расчете регулировочных характеристик  $I_{эф} = f(\alpha)$  действующее значение тока определяют по формуле

$$I_{эф} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda/\omega} i'^2 dt}. \quad (5.5)$$

По формуле (5.5) построено семейство регулировочных характеристик при различных значениях угла  $\varphi$  (рис. 5.8). Пользуясь этими характеристиками, можно определить значение тока  $I_{эф}$  по заданному углу  $\alpha$  включения тиристором. Можно решить также обратную задачу: по требуемому значению сварочного тока определяется необходимый угол включения тиристором.

При малом времени сварки ( $t_{св} \ll 0,01$  с) форма импульса токов в каждом полупериоде существенно сказывается на характере процесса тепловыделения. Форма импульса тока и его передний фронт зависят от углов  $\alpha$  и  $\varphi$ . Крутизна переднего фронта импульса тока характеризуется скоростью нарастания тока в начальный момент времени:

$$\left. \frac{di'}{dt} \right|_{t=0} = \omega [\cos(\alpha - \varphi) + \operatorname{ctg} \varphi \sin(\alpha - \varphi)]. \quad (5.6)$$

Для любых значений  $\varphi$  производная  $\left. \frac{di'}{dt} \right|_{t=0}$  имеет максимум при  $\alpha = \pi/2$  (рис. 5.9). Наиболее крутой передний фронт импульса тока имеет место при малых значениях  $\varphi$  и  $\alpha = \pi/2$ , а наиболее пологий — при больших  $\varphi$  (например, при введении дополнительной индуктивности) и  $\alpha \rightarrow 0$ . Уменьшение угла  $\alpha$  целесообразно также для достижения максимального использования активной мощности. При этом следует учитывать, если  $t_{св} > 0,01$  с, т. е. при сварке, производимой несколькими полупериодами тока, то для исключения аварийного выпрямительного режима, при котором происходит пропуск включения второго тиристора, должно соблюдаться условие:

$$\alpha \geq \varphi. \quad (5.7)$$

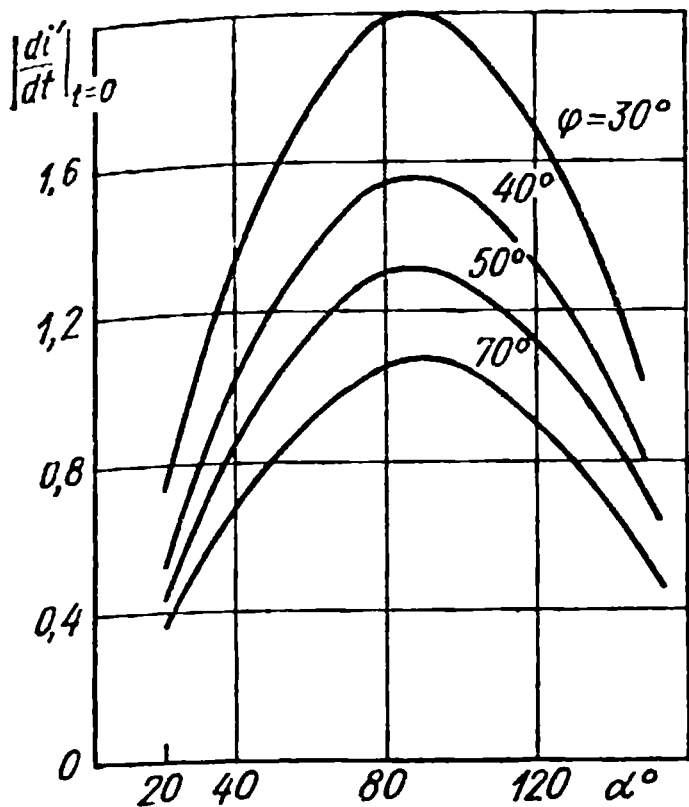
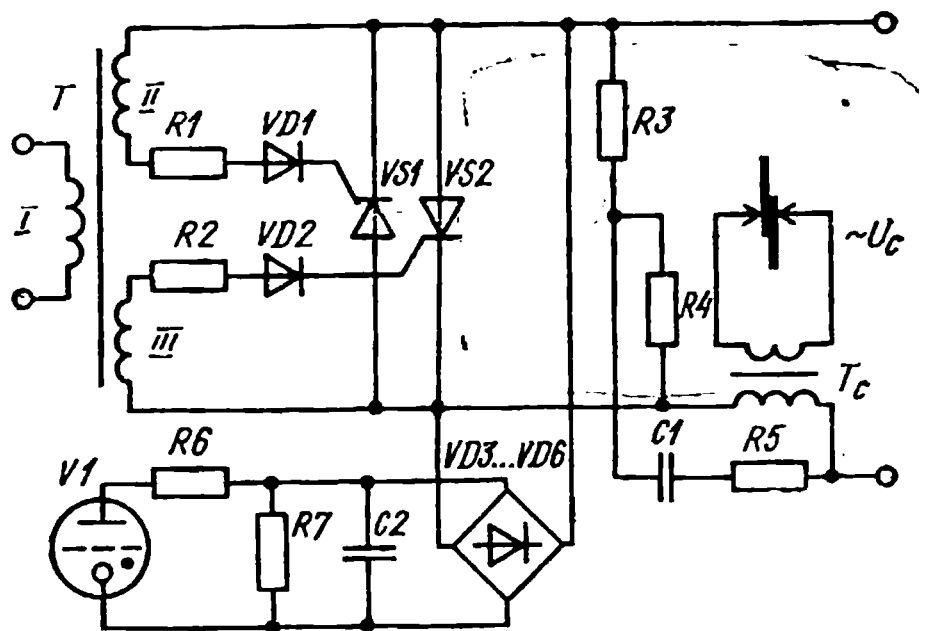


Рис. 5.9. Зависимость  $\left. \frac{di'}{dt} \right|_{t=0} = f(\alpha)$

Рис. 5.10. Схема тиристорного контактора



**Тиристорные контакторы.** В качестве управляемых вентилях в контакторах, предназначенных для включения, отключения, а также изменения величины сварочного тока в контактных машинах, применяются тиристоры, которые имеют значительные преимущества по сравнению с использовавшимися длительное время игнитронами: малое падение напряжения на вентиле; небольшую массу и габариты; высокую надежность; значительный срок службы и др.

Регулирование действующего значения сварочного тока через контактор осуществляется смещением относительно напряжения сети момента подачи импульса на управляющий электрод вентиля. Особенностью работы контактора является потеря им управляемости в каждом полупериоде с момента включения до момента времени, при котором ток проходит через нулевое значение.

Принципиальная схема тиристорного контактора приведена на рис. 5.10. Два тиристора  $VS1$  и  $VS2$  включены встречно-параллельно. Их управляющие электроды через диоды  $VD1$ ,  $VD2$  и резисторы  $R1$ ,  $R2$  подключены к обмоткам  $II$  и  $III$  трансформатора  $T$ . Первичная обмотка  $I$  трансформатора  $T$  подключена к выходу регулятора цикла сварки  $PЦС$ . Параллельно тиристорам включена цепь  $R3-R4-C1$ . Первичная обмотка сварочного трансформатора  $T_c$  зашунтирована резистором  $R5$ . Схема сигнализации собрана на диодах  $VD3-VD6$ , резисторах  $R6$ ,  $R7$ , конденсаторе  $C2$  и тиратроне с холодным катодом (или неоновой лампе)  $V1$ .

В исходном состоянии тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  закрыты и не проводят ток. С  $PЦС$  на обмотку  $I$  трансформатора  $T$  поступают униполярные симметричные импульсы с частотой, в два раза превышающей частоту сети. Со вторичных обмоток  $II$  и  $III$  эти импульсы подаются на управляющие электроды  $VS1$  и  $VS2$ . Поскольку тиристоры соединены встречно-параллельно, то включится тот из них, к аноду которого в данный момент времени прикладывается положительная полуволна напряжения. В следующий полупериод включится другой тиристор, и таким образом через сварочный трансформатор  $T_c$  будет протекать переменный ток. Резисторы  $R1$ ,  $R2$  служат для ограничения тока в цепи управляющих электродов  $VS1$  и  $VS2$ . Для ограничения



скорости нарастания напряжения на тиристорах во время коммутации и снижения импульсных перенапряжений служит цепь  $R3-R4-R5-C1$ .

Схема сигнализации позволяет контролировать режим полнофазного тока. В исходном состоянии, когда тиристоры  $VS1, VS2$  не проводят ток, к индикатору  $VI$  через выпрямительный мост приложено напряжение сети и он зажигается. При открытых тиристорах  $VS1, VS2$  интенсивность свечения индикатора зависит от фазы их включения. В предельном состоянии, когда через сварочный трансформатор протекает полнофазный ток, сопротивление контактора и падение напряжения на нем минимальны и тиратрон  $VI$  гаснет. Сглаживающий конденсатор  $C2$  служит для повышения устойчивости горения тиратрона.

Отечественной промышленностью выпускается несколько типов тиристорных контакторов, которыми комплектуются контактные машины для точечной и шовной сварки. Основное отличие этих контакторов заключается в силовых тиристорах, которые устанавливаются в зависимости от требуемого номинального тока (см. прил. 17).

**Регуляторы цикла сварки.** Они предназначены для задания временных интервалов сварочного цикла, плавного регулирования величины сварочного тока, а также включения и выключения в заданные моменты времени пневматических клапанов сварочной машины. Основные элементы регуляторов: блоки задания времени  $B3B$ , тока  $B3T$  и фазовращатель  $\Phi$  (см. рис. 5.6).

*Блоки задания времени  $B3B$*  регуляторов включения оператором-сварщиком pedalной кнопки отрабатывают последовательность операций, заранее заданных при помощи соответствующих переключателей, расположенных на передней панели регулятора.

Простейший цикл состоит из четырех последовательных операций: «сжатие», «сварка», «ковка», «пауза» (см. рис. 5.3). Более сложные циклы содержат дополнительные операции: «предварительное сжатие», «предварительный подогрев», «отжиг» и т. п.

По принципу задания временных интервалов регуляторы подразделяются на аналоговые и дискретные. Аналоговые регуляторы, например, выпускавшиеся ранее РВЭ-7, для отсчета временных интервалов используют заряд и разряд конденсаторов. Выдержка времени каждой операции в этом случае определяется временем заряда или разряда конденсатора, уровень напряжения на котором обеспечивает срабатывание соответствующей триггерной схемы или включение электромеханического реле. Недостаток аналоговых регуляторов — нестабильность работы и значительная погрешность задания временных интервалов.

В настоящее время эти регуляторы вытеснены счетными схемами, работающими на дискретном принципе. Основным элементом таких схем является счетчик электрических импульсов, выполненный как единое целое (декатрон, интегральная микросхема) либо собранный из отдельных элементов (триггер, ферритдиодная ячейка). Принцип работы этих схем заключается в следующем. На вход счетчика подаются импульсы частотой 50 или 100 Гц, формируемые генератором синхронно с сетью. Счетчик отсчитывает требуемое количество импульсов,

заданное уставкой при помощи переключателей. Когда число импульсов, поступивших на вход счетчика, станет равным заданному, выдержка времени заканчивается и происходит срабатывание исполнительного устройства.

Точность работы регуляторов, построенных на дискретных элементах, значительно выше, чем аналоговых. Отечественной промышленностью была выпущена серия регуляторов типа РВД на декатронах. Наиболее распространены регуляторы, выполненные на дискретных полупроводниковых элементах. Серийно выпускаются регуляторы цикла сварки типа РЦС, в которых используются элементы типа «Логика-Т» [7].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР разработана серия регуляторов времени типа РВТ, в которых в качестве дискретных элементов используются маломощные тиристоры типа КУ-201. В настоящее время разработаны и подготовлены к серийному выпуску регуляторы времени тока РВИ и РКС на интегральных микросхемах.

Рассмотрим *блоки задания величины и формы импульса сварочного тока БЗТ*. В простейшем случае величина тока задается при помощи постоянного управляющего напряжения, подаваемого на вход фазовращателя. В некоторых схемах БЗТ совмещен с фазовращателем, так, что задание тока осуществляется изменением величины сопротивления резистора, включенного в мостовую схему фазовращателя.

Для задания плавного нарастания и снижения тока применяются модуляторы, принцип работы которых основан на заряде или разряде конденсатора. На вход фазовращателя в этом случае подается управляющее напряжение  $u_{упр}$ , изменяющееся по законам нарастания или уменьшения:

$$u_{упр} = U_0 e^{-t/\tau} \text{ или } u_{упр} = U_0 (1 - e^{-t/\tau}). \quad (5.8)$$

Эти модуляторы применяются во многих регуляторах цикла сварки, например типа РЦС, РВТ. Основное их преимущество — простота схемной реализации и надежность в работе. Однако они обладают существенными недостатками:

а) скорость нарастания  $u_{упр}$ , а следовательно, и сварочного тока в начале цикла больше, чем в конце, так как

$$\frac{du_{упр}}{dt} = \frac{U_0 e^{-t/\tau}}{\tau} \quad (5.9)$$

и при  $t \rightarrow 0$   $\frac{du_{упр}}{dt} \rightarrow \frac{U_0}{\tau}$ , а при  $t \rightarrow \infty$   $\frac{du_{упр}}{dt} \rightarrow 0$ .

Это увеличивает возможность образования выплесков в начале сварки, что снижает эффективность применения модуляторов, так как их основное назначение — уменьшение начальных выплесков;

б) невозможность задания формы импульса сварочного тока, отличной от экспоненциальной, что ограничивает технологические возможности процесса сварки:

в) вероятность возникновения постоянной составляющей в первичной обмотке сварочного трансформатора, так как при непрерывном изменении управляющего напряжения углы включения вентиля ти-

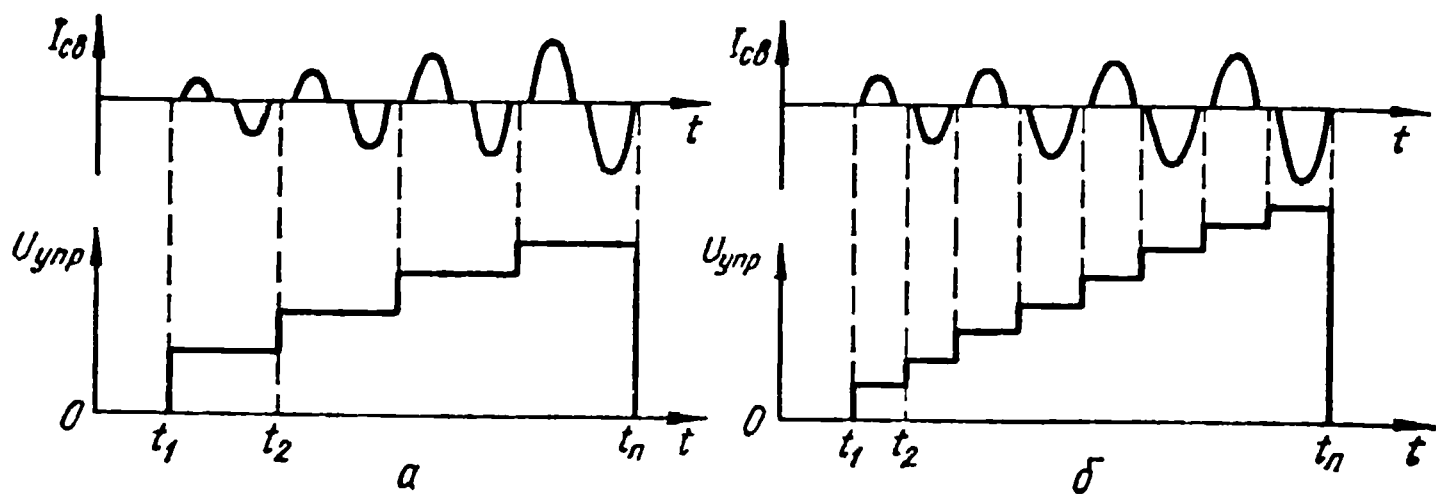


Рис. 5.11. Ступенчатое задание формы импульса тока:  
 а — через период; б — через полупериод

ристорного контактора в положительном и отрицательном полупериодах оказываются различными.

Для задания управляющего напряжения  $u_{упр}$  иной формы необходимо использовать модуляторы, в которых преобразуется выходной сигнал и таким образом обеспечивается требуемая форма импульса сварочного тока. Например, линейные модуляторы, выходное напряжение которых изменяется по закону  $u_{упр} = kt$ , либо квадратичные модуляторы, для которых  $u_{упр} = kt^2$ . В последнем случае обеспечивается плавное нарастание тока с переменной скоростью, увеличивающейся со временем, что существенно уменьшает вероятность появления выплесков в начале сварки.

Наибольшими возможностями обладают программирующие устройства, работающие на дискретном принципе и позволяющие задавать  $u_{упр}$  не в виде непрерывной кривой, а ступенчато (рис. 5.11). Величина ступени  $u_{упр}$  остается постоянной в течение каждого периода или полупериода. При этом можно задать любую форму кривой тока с требуемой точностью. Программа режима сварки может быть записана в памяти ЭВМ или на отдельном носителе, например, перфокарте в цифровом виде и в дальнейшем автоматически повторяться требуемое число раз. Такие программирующие устройства можно применять при индивидуальном или групповом управлении сварочными машинами и использовать вместо нескольких обычных регуляторов цикла сварки.

Напряжение  $u_{упр}$ , вырабатываемое БЗТ или программирующим устройством, подается на вход фазовращателя, который формирует импульсы включения тиристорных контакторов. Изменяя фазу этих импульсов относительно синусоиды питающего напряжения, можно плавно регулировать эффективное значение сварочного тока.

Фазовращатели простейшей конструкции выполняют по мостовой схеме (рис. 5.12) с регулированием фазы выходного напряжения ( $U_R, U_{RP1}$ ), изменяя активное сопротивление  $RP2$  — «нагрев».

Импульсные фазовращатели (рис. 5.13) содержат генератор пилообразного напряжения и узел сравнения (компаратор). Генератор пилообразного напряжения собран на транзисторе  $VT1$ . В исходном положении транзистор  $VT1$  закрыт и конденсатор  $C2$  заряжается через резистор  $R4$  от напряжения источника питания. Параметры зарядной цепи выбираются так, что используется только линейный нарастающий участок напряжения заряда. На базу транзистора  $VT1$

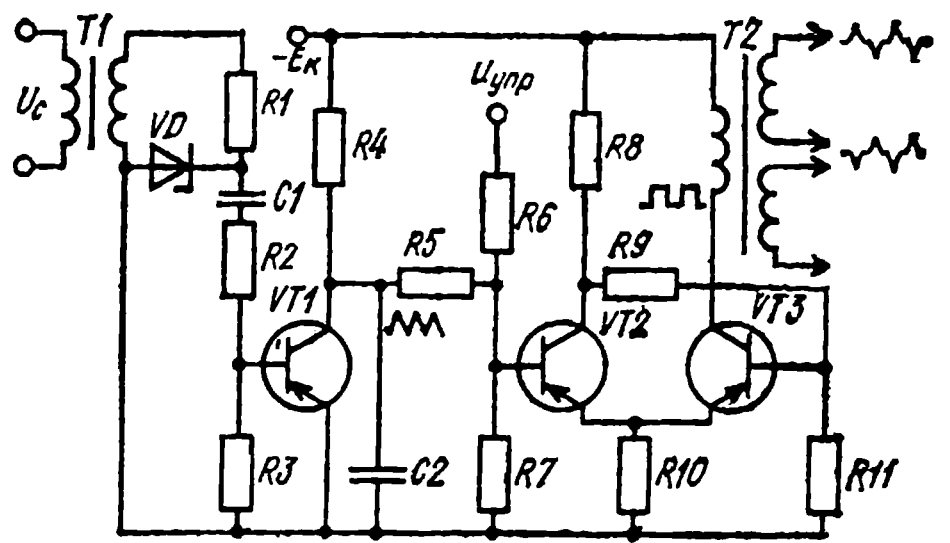
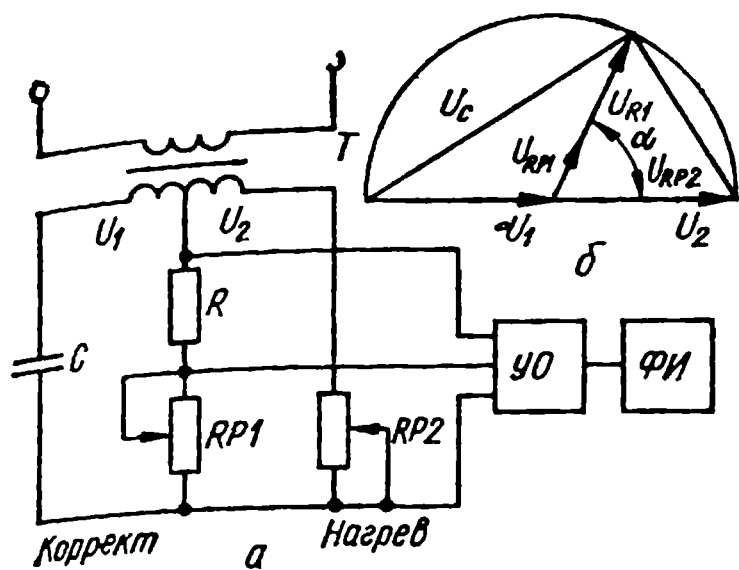


Рис. 5.12. Фазовращатель:

а — схема; б — векторная диаграмма; УО — усилитель-ограничитель; ФИ — формирователь импульсов

Рис. 5.13. Схема импульсного фазовращателя

подаются импульсы частотой 100 Гц, синхронизированные с частотой питающей сети. В момент прихода отрицательного импульса на базу  $VT1$  транзистор открывается и конденсатор  $C2$  быстро разряжается. Процесс заряда и разряда конденсатора  $C2$  продолжается периодически с частотой следования импульсов 100 Гц.

Пилообразное напряжение с конденсатора  $C2$  через резистор  $R5$  подается на вход компаратора. На этот же вход подается управляющее напряжение  $u_{упр}$ . Компаратор представляет собой несимметричный триггер с положительной эмиттерной связью, собранный на транзисторах  $VT2$  и  $VT3$ . Этот триггер представляет собой импульсное устройство, в котором при достижении входным сигналом определенного уровня происходит быстрый переход из одного состояния в другое. Уровень срабатывания триггера, определяемый падением напряжения на резисторе  $R10$ , выбирается таким, чтобы при отсутствии напряжения  $u_{упр}$  переброса не происходило. При подаче  $u_{упр}$  суммирование его с пилообразным напряжением приводит к срабатыванию триггера, транзистор  $VT2$  открывается, а  $VT3$  закрывается. На коллекторе  $VT3$  формируется прямоугольный импульс напряжения, длительность которого пропорциональна напряжению  $u_{упр}$ . Изменяя величину  $u_{упр}$ , можно смещать передний фронт прямоугольного импульса. Этот импульс дифференцируется трансформатором  $T2$ , во вторичных обмотках которого формируются импульсы напряжения. Фаза этих импульсов соответствует переднему фронту прямоугольных импульсов и пропорциональна управляющему напряжению  $u_{упр}$ . Со вторичных обмоток  $T2$  импульсы управления подаются на управляющие электроды тиристоры тиристорного контактора  $TK$  (см. рис. 5.6).

### 5.3. Типовые регуляторы времени и циклов сварки

Регуляторы времени РВТ. Они построены на основе маломощных тиристоры, которые используются для выполнения логических операций, включения исполнительных устройств (электропневматических клапанов, тиристорных или игнитронных контакторов) и сигнализации. Совмещение в одном активном элементе (тиристоре) логических функций и усилителя мощности позволило упростить принципиальные электрические схемы аппаратуры управления. В резуль-

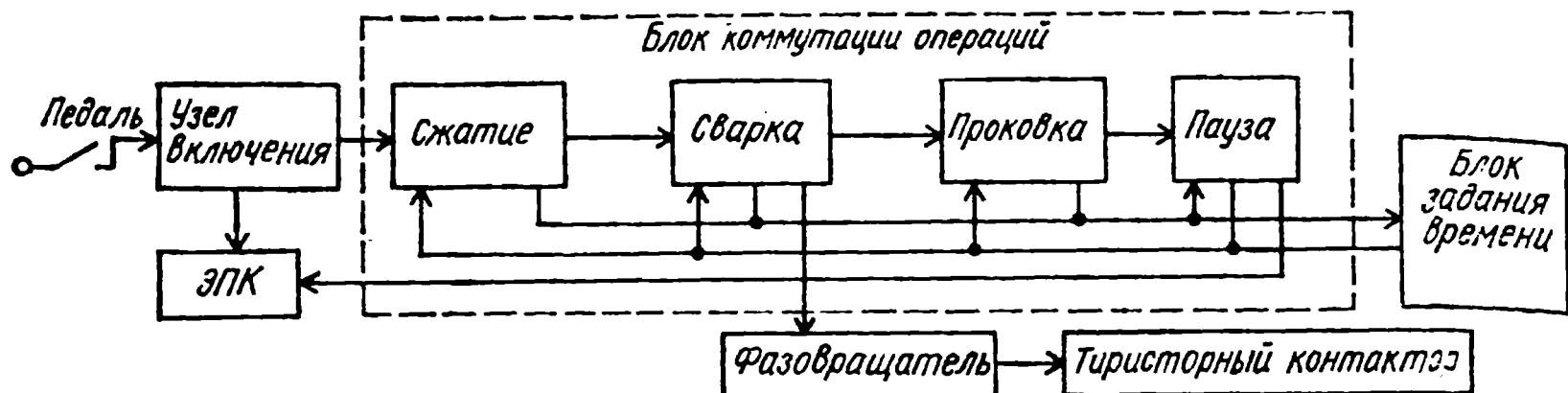


Рис. 5.14. Функциональная схема регулятора времени

тате повысилась надежность работы устройств и увеличился срок их службы.

Регуляторы РВТ позволяют задавать величину и длительность трех независимых импульсов тока («подогрев», «сварка», «отжиг»), а также изменять по программе усилие сжатия электродов. Электропневмоклапаны и тиристоры (игнитроны) силового контактора включаются бесконтактными тиристорными ключами. Регулятор снабжен фазовращателем, обеспечивающим модуляцию и безынерционную стабилизацию сварочного тока.

Схема простейшего регулятора времени типа РВТ, обеспечивающего задание четырех операций: «сжатие», «сварка», «проковка», «пауза», приведена на рис. 5.14. Регулятор представляет собой аналоговую систему управления с времязадающим контуром  $RC$ , синхронизированным импульсами частотой питающей сети. Схема содержит блок коммутации операций сварочного цикла, блок задания времени, фазовращатель и узел включения. При подаче напряжения на схему и включении педали блок коммутации обеспечивает поочередное включение тиристорных ячеек, задающих последовательность операций цикла. Узел включения открывает тиристор ячейки «сжатие». Остальные ячейки находятся в закрытом состоянии. Через открытый тиристор первой ячейки включается  $B3B$ . Происходит отсчет длительности операций «сжатие», которая задается с помощью набора резисторов. Одновременно открывается тиристор, включающий обмотку электромагнита пневмоклапана ЭПК. По истечении заданного времени первой операции  $B3B$  вырабатывает импульс переключения, поступающий одновременно на входы всех ячеек пересчетной схемы. Ячейка выполнена таким образом, что импульс переключения проходит на управляющий электрод тиристора той ячейки, которая следует непосредственно за включенной. Поэтому откроется только тиристор ячейки «сварка», а тиристор предыдущей ячейки закроется за счет подачи импульса гашения. Начинается отсчет времени следующей операции. При этом ЭПК остается во включенном состоянии. Аналогично отрабатываются все остальные операции.

Напряжение, снимаемое с нагрузки тиристора ячейки «сварка», подается на фазовращатель. Выходные импульсы фазовращателя управляют тиристорным контактором, который обеспечивает подключение сварочного трансформатора к сети. После отработки последней операции схема приходит в исходное состояние.

Регуляторы РВТ обеспечивают отработку длительности операций от 0,02 до 2 с дискретностью 0,02 с и в диапазоне от 0,04 до 4 с



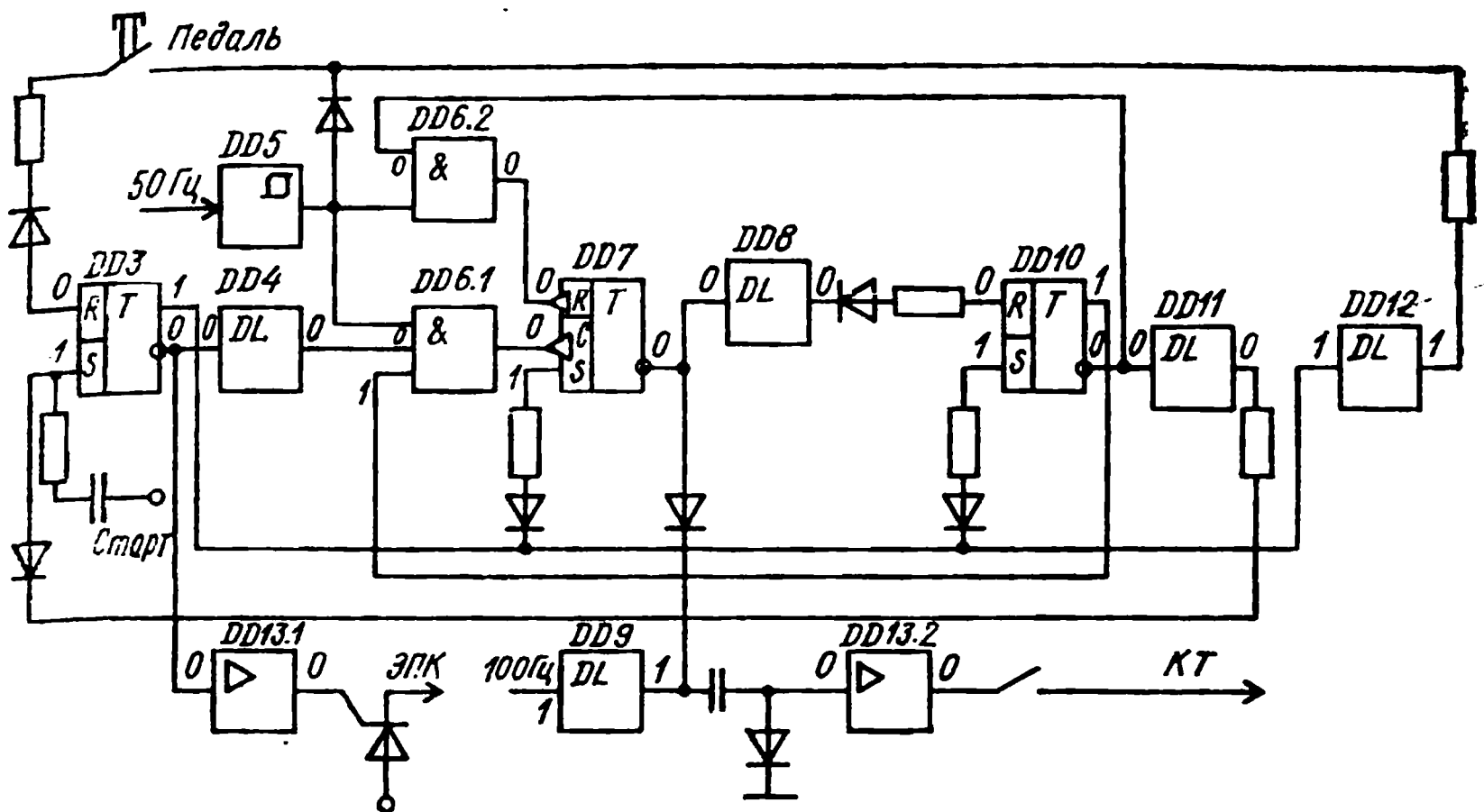


Рис. 5.15. Функциональная схема регулятора цикла сварки РЦС-403

с дискретностью 0,04 с. Принципиальные электросхемы и работа основных блоков регулятора приведены в прил. 18.

**Регуляторы цикла сварки РЦС.** Они выполнены на унифицированных транзисторно-диодных элементах серии «Логика Т» [39]. Функциональная схема представителя этой группы регуляторов РЦС-403 показана на рис. 5.15. Последовательное включение четырех элементов времени  $DD4$ ,  $DD8$ ,  $DD11$ ,  $DD12$  (Т-303) обеспечивает регулирование интервалов операций сварочного цикла при точечной сварке: «сжатие», «сварка», «проковка», «пауза» в пределах от 0,02 до 2 с дискретно через 0,02 с для операции «сварка» и от 0,06 до 1,4 с плавно для других.

Включение напряжения сети приводит к подаче напряжения 12 В на дифференцирующую цепь «старт», на выходе которой появится на короткое время «1», устанавливающая триггер  $DD3$  по прямому выходу в единичное положение. С прямого выхода  $DD3$  «1» поступает на входы  $S$  триггеров  $DD7$  и  $DD10$ , а также на вход выдержки времени «пауза»  $DD12$ . Через определенное время, задаваемое регулятором длительности «пауза» на выходе  $DD12$ , появится «1», которая из-за разомкнутой педали на вход  $R$  триггера  $DD3$  не попадает. На инверсном выходе  $DD3$  и, соответственно, на  $DD13.1$  сохраняется «0». Электропневмоклапан выключен. В качестве фазосдвигающего устройства используется элемент  $DD9$  (Т-303). На его вход подается двухполупериодное выпрямленное отрицательное напряжение 8 В частотой 100 Гц. Каждая полуволна вызывает на выходе  $DD9$  прямоугольный импульс, передний фронт которого задержан относительно начала полуволны на промежуток, определяемый настройкой  $RC$ -цепи  $DD9$ . Таким образом, на выходе  $DD9$  формируются прямоугольные импульсы с частотой 100 Гц, фазовое положение которых определяется регулировкой «нагрев». Однако до отработки операции «сварка» эти импульсы на  $DD9$  отсутствуют, так как его выход шунтирован нулем на инверсном выходе  $DD7$ .



После замыкания педали (установленной на сварочной машине) триггер *DD3* переключится подачей «1» на вход *R*. Соответственно, на входах *S* триггеров *DD7*, *DD10* и *DD12* установится «0». Одновременно «1» с инверсного выхода *DD3* поступает на входы *DD13.1*, *DD4*. Срабатывает электропневматический клапан, электроды сжимаются, идет счет времени «сжатие». Педаль может быть отпущена, так как триггер *DD3* взял на себя функцию элемента, «помнящего» о том, что цикл сварки начался и не может быть прерван до конца. Выходной сигнал *DD4* подается на *DD6.1*; на другой вход этой же схемы с прямого выхода *DD10* подается «1», а третий вход *DD6.1* соединен с выходом *DD5* — триггера синхронизации, формирующего прямоугольные импульсы с частотой 50 Гц. Появление и снятие первого импульса на выходе *DD6.1* приведет к срабатыванию триггера *DD7* по импульсному входу *C*. С этого момента на инверсном выходе *DD7* появляется «1», которая открывает выход *DD9* и запускает задержку *DD8* интервала времени «сварка». Прямоугольные импульсы с выхода *DD9* дифференцируются цепочкой  $CR_{\text{вх}}$  диода и усиливаются элементом *DD13.2*. Нагрузкой усилителя *DD13.2* является импульсный трансформатор тиристорного контактора.

Сварочный ток продолжается до тех пор, пока *DD8* отработывает выдержку времени «сварка». После окончания этой выдержки срабатывает триггер *DD10* от «1» по входу *R* и на прямом выходе его устанавливается «0», который запирает схему *DD6.1*. От «1» на инверсном выходе *DD10* запустится выдержка времени «проковка» *DD11* и подготовится к срабатыванию схема *DD6.2*. Другой вход схемы *DD6.2* соединен с выходом триггера синхронизации и поэтому переключение триггера *DD7* по импульсному входу *R* произойдет в тот же момент времени, что и при включении сварочного тока. Таким образом осуществляется синхронное с сетью выключение сварочного тока и обеспечивается симметричность его полуволн в процессе сварки. Цикл заканчивается после появления «1» на выходе *DD11*, которая перебрасывает триггер *DD3* по входу *S*. Усилитель *DD13.1* отключается. Все элементы занимают исходное положение, отсчитывается время «пауза». Если по ее окончании, т. е. с появлением «1» на выходе, педаль будет замкнута, то цикл работы регулятора повторится.

Регуляторы РСС-403 при высокой производительности (до 750 точек в минуту) и надежности (гарантированный срок службы элементов, из которых собрана схема, 5 лет) обеспечивают синхронное включение сварочного тока, четное число полуволн сварочного тока и плавную его регулировку, постоянство установленных значений выдержек времени сварки, что облегчает решение задач по стабилизации качества сварных точек.

Регуляторы цикла сварки на интегральных микросхемах. В последние годы на основе достижений микроэлектроники разработаны регуляторы цикла сварки с применением интегральных микросхем. Схема этих регуляторов принципиально не отличается от рассмотренной выше и содержит такие же основные узлы и блоки (см. рис. 5.14).

Регуляторы цикла сварки типа РКС-501 (РКС-601, РКС-901) выполнены на интегральных микросхемах серии К155. Основные техни-

ческие характеристики этих регуляторов аналогичны регуляторам типа РВТ и РЦС, однако использование интегральных микросхем обеспечивает повышение надежности регуляторов и увеличение их срока службы. Регулятор РКС-501 имеет 5 независимо регулируемых временных интервалов: «предварительное сжатие», «сжатие», «сварка», «проковка» и «пауза». Модификации этого регулятора позволяют увеличить количество регулируемых интервалов времени, обеспечивая режим пульсирующей сварки с приложением повышенных усилий обжатия и проковки.

По принципу действия регулятор относится к системам дискретного задания временных интервалов по периодам питающей сети. В качестве основной дискретной ячейки используется триггер типа К155ТМ2, который является основой для построения пересчетных схем. Другие функции схемы выполняются на логических элементах типа К155ЛА3, К155ЛА4. Регуляторы РКС взаимозаменяемы с регуляторами РЦС. На интегральных микросхемах разработана также схема регуляторов типа РВИ-501 (РВИ-703, РВИ-801), схема которого аналогична схеме на рис. 5.14. Модификации регуляторов типа РВИ позволяют реализовать различные режимы работы сварочных машин: обеспечивают пульсирующий режим по току, отдельную регулировку нагрева для двух различных импульсов тока, автоматический выход на полнофазный ток, управление двумя электропневматическими клапанами, приложение повышенного уровня на время проковки и предварительное обжатие деталей. Эти регуляторы выполнены на интегральных микросхемах серии К511. Отличительная особенность их — повышенная помехозащищенность, что особенно важно в условиях мощных электрических и магнитных помех. Принцип работы регуляторов также основан на дискретном отсчете времени по периодам напряжения питающей сети. В качестве основного дискретного элемента используется счетчик импульсов, выполненный на двух интегральных микросхемах, К511ИЕ1 — двоично-десятичный четырехразрядный счетчик на триггерах и К511ИД1 — дешифратор на 10 выходов. Таким образом, два счетчика, собранные на четырех интегральных микросхемах, обеспечивают отсчет времени, равного 99 периодам напряжения питающей сети. Эти регуляторы также взаимозаменяемы с другими типами регуляторов.

Перспективным является использование контролеров, выполненных на базе микропроцессоров, например серии К580. Контролеры позволяют хранить в памяти несколько десятков программ режима сварки (включая последовательность и длительность операций), значения токов сварки, подогрева, отжига, сварочного и ковочного усилия сжатия и т. п. Требуемую программу режима может вызвать оператор-сварщик, включая клавиши терминала в зависимости от марки материала и толщины свариваемого изделия. Вызванная программа обрабатывается контролером и таким образом обеспечивается заданный цикл сварки.

## 5.4. Автоматическое регулирование процессов точечной и шовной сварки

Системы автоматического регулирования обеспечивают стабилизацию или программное изменение параметров процесса сварки. Выбор параметра регулирования — одна из основных задач при создании САР. Несмотря на то, что ни один из отдельно взятых параметров не может полностью характеризовать процесс сварки, в ряде случаев применение САР по некоторым параметрам позволяет обеспечить заданное качество сварки. К первой группе относятся электрические параметры: сварочный ток  $I_{св}$ ; параметр  $(I_{св}^2 t)$ ; мощность  $Q$ ; энергия  $E$ ; падение напряжения на электродах  $U_{эл}$ ; сопротивление участка цепи между электродами  $R_{эл}$ .

Ко второй группе относятся параметры, характеризующие процесс формирования сварного соединения: температура  $T$ ; интенсивность ИК-излучения  $S$ ; перемещение электродов  $\Delta h_{эл}$  и др.

В общем случае, независимо от выбранной регулируемой величины, функциональная схема замкнутой САР выполняется по общей схеме (см. рис. 1.6), в которой функции усилителя выполняет фазовращатель с соответствующей схемой управления, исполнительного устройства — тиристорный контактор, управляющий трансформатором сварочной машины, являющейся объектом регулирования.

**Автоматическое регулирование сварочного тока.** В машинах для контактной сварки наибольшее распространение получила схема питания переменным током промышленной частоты. Достаточно широко применяются схемы питания аккумулялированной энергией (в электрическом поле конденсатора), а в последние годы — питание постоянным током или током низкой частоты.

Ток измеряют специальными измерительными преобразователями, в качестве которых используют шунты, трансформаторы тока, пояс Роговского, датчики Холла и др. Поскольку вторичные токи контактных машин достигают несколько десятков и даже сотен килоампер, наиболее удобным датчиком тока является пояс Роговского. Датчики Холла используются для измерения больших токов, однако не являются достаточно стабильными, особенно при колебании температуры окружающей среды. Шунты и измерительные трансформаторы на большие токи имеют слишком громоздкую конструкцию.

Пояс Роговского представляет собой тороид из немагнитного материала, например, текстолита, равномерно обвитый тонким проводом (рис. 5.16). Этот тороид устанавливается на токоведущих частях вторичного контура сварочной машины (рис. 5.17). Э. д. с. на выходе пояса Роговского пропорциональна скорости изменения сварочного тока:

$$e = -\mu_0 F \frac{\omega}{l} \frac{di_{св}}{dt}, \quad (5.10)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $F$  — поперечное сечение тороида;  $\omega$  — количество витков обмотки;  $l$  — длина средней линии тороида.

Напряжение с тороида подается на интегратор, выходное напряжение которого оказывается пропорциональным мгновенному значению сварочного тока  $i_{св}$ . Простейший интегратор представляет собой

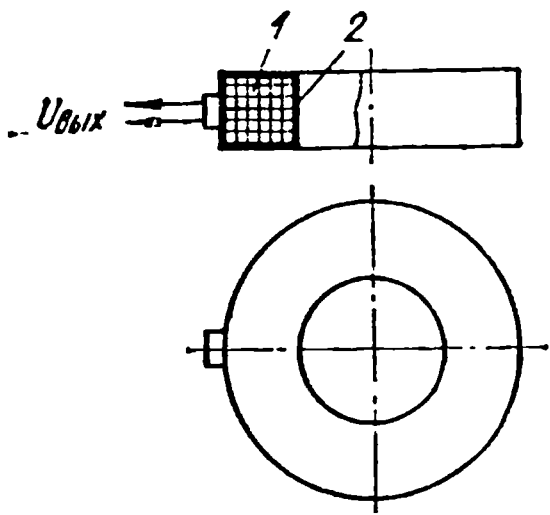


Рис. 5.16. Пояс Роговского — торонд:  
1 — сердечник из немагнитного материала;  
2 — обмотка

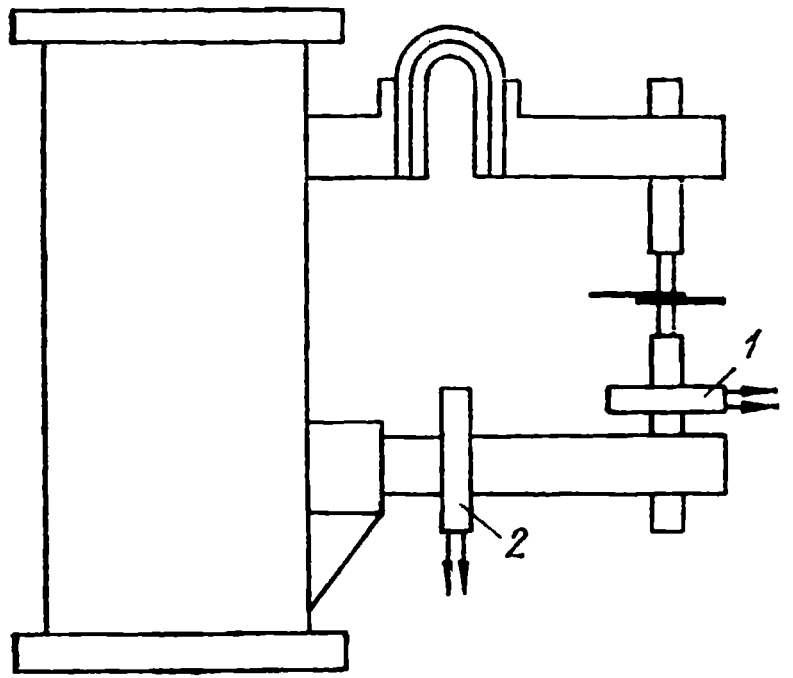


Рис. 5.17. Расположение торонда на сварочной машине:  
1 — на свече; 2 — на нижней токоведущей консоли

RC-цепь (рис. 5.18,а), на выходе которой напряжение приблизительно пропорционально интегралу от входного сигнала:

$$u_{\text{вых}} = u_c = \frac{1}{RC} \int_0^{t_n} u_{\text{вх}} dt, \quad (5.11)$$

если  $RC \gg t_n$ .

Погрешность интегрирования можно уменьшить при использовании операционных усилителей на интегральных микросхемах (рис. 5.18,б). Контакт S предназначен для установки нулевых начальных условий на конденсаторе. Дальнейшее преобразование сигнала зависит от того, какое значение тока необходимо измерять для регулирования: действующее  $I_{\text{св}}$ , среднее  $I_{\text{ср}}$  или амплитудное  $I_m$ . В машинах для конденсаторной сварки, низкочастотных и постоянного тока обычно измеряют амплитудное значение  $I_m$ . В машинах переменного тока — действующее  $I_{\text{св}}$  или среднее значение тока  $I_{\text{ср}}$ . Действующее значение тока наиболее тесно связано тепловыми характеристиками процесса сварки, однако иногда для упрощения измерительной аппаратуры в системах регулирования используют среднее значение тока. Для получения действующего значения тока необходимо выполнить преобразование:

$$I_{\text{св}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{св}}^2 dt}. \quad (5.12)$$

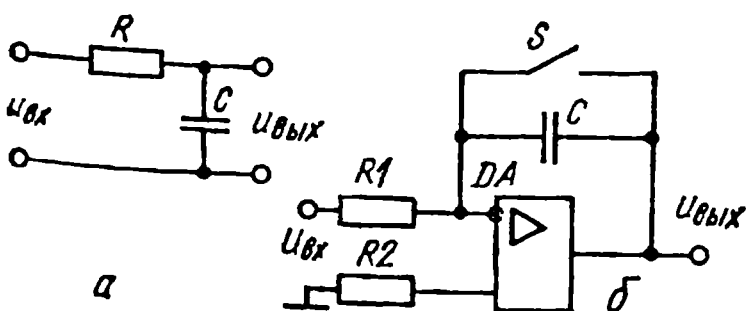


Рис. 5.18. Принципиальная схема интегратора:  
а — на пассивной RC-цепи; б — с использованием операционного усилителя

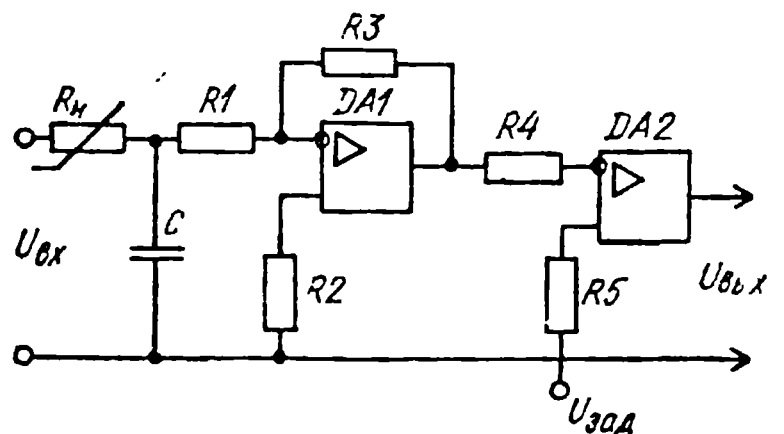


Рис. 5.19. Измерительный узел регулятора параметра  $I_{\text{св}}^2 t$

Для получения среднего значения

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i_{\text{св}} dt, \quad (5.13)$$

где  $T$  — период напряжения питающей сети.

Из сравнения (5.12) и (5.13) видно, что аппаратная реализация закона (5.13) значительно проще, чем (5.12). Реализацию закона (5.13) можно получить, если на вход интегратора (рис. 5.18,б) подать напряжение, пропорциональное сварочному току, а ключ  $S$  включать и выключать синхронно с частотой питающей сети. В этом случае в конце каждого полупериода  $T/2$  на выходе схемы будет получено напряжение, пропорциональное среднему значению тока. Таким образом, для получения этого напряжения сигнал с выхода пояса Роговского необходимо проинтегрировать дважды. Напряжение, пропорциональное переменному току, сравнивается с эталонным значением. Полученный сигнал ошибки используется для управления фазовращателем, устанавливающим такой угол включения контактора, при котором среднее значение сварочного тока равно заданному. Современные регуляторы обеспечивают стабилизацию сварочного тока с погрешностью не более  $\pm 1 \div \pm 2 \%$ . Быстродействие схемы составляет 2—3 периода напряжения питающей сети. За счет некоторого усложнения электронной схемы можно повысить быстродействие до 1—0,5 периода, что необходимо при сварке короткими импульсами тока и при программном управлении.

Применение регуляторов тока позволяет устранить влияние на качество сварки колебаний напряжения питающей сети, изменения сопротивления контура машины вследствие его нагрева или внесения ферромагнитных масс.

Регуляторы параметра  $(I_{\text{св}}^2 t)$ . Зависимость между временем протекания сварочного тока и размерами ядра точек позволяет создать устройство для стабилизации прочности шва путем регулирования времени сварки. Однако регуляторы, реализующие закон  $I_{\text{св}}^2 t = \text{const}$ , недостаточно увеличивают время сварки при уменьшении тока, т. е. работают с недокомпенсацией. Лучшее приближение к оптимальному закону изменения времени сварки дают регуляторы, поддерживающие постоянным произведение квадрата сварочного тока (обычно действующего значения) на время сварки  $I_{\text{св}}^2 t = \text{const}$ . Особенностью этих регуляторов является то, что они воздействуют на время прохождения сварочного тока. При достижении величиной  $(I_{\text{св}}^2 t)$  заданного уставкой значения прекращается подача импульсов включения на тиристорный контактор и сварочный ток отключается.

Принципиальная схема измерительного устройства регулятора приведена на рис. 5.19. Схема состоит из входной  $R_n C$  цепи и двух операционных усилителей  $DA1$  и  $DA2$ , причем  $DA2$  работает в режиме компаратора. Входной сигнал, пропорциональный действующему или среднему значению сварочного тока, подается на вход схемы. Если соблюдается условие  $\tau = R_n C \gg t_{\text{св}}$ , а нелинейное сопротивление

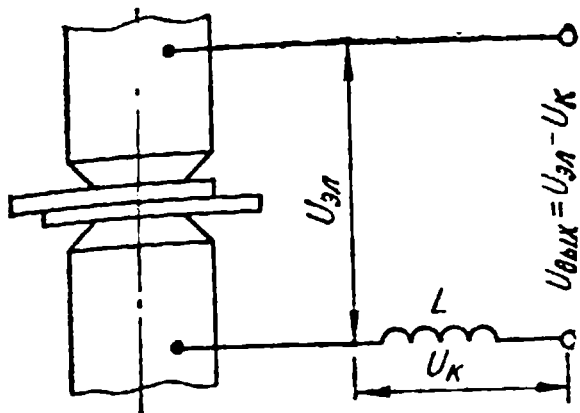


Рис. 5.20. Схема компенсации наводки при измерении  $U_{эл}$

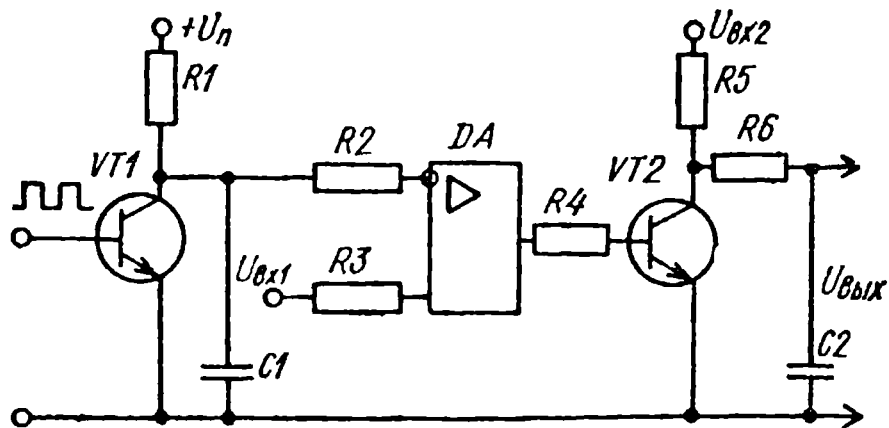


Рис. 5.21. Измерительный узел регулятора мощности

$R_{II}$  имеет квадратичную зависимость, то напряжение на конденсаторе  $C$

$$U_c = k I_{св}^2 t.$$

При  $U_c = U_{зад}$  в момент  $t_1$  на выходе компаратора появляется напряжение, которое обеспечивает запирающее действие тиристорного контактора и отключение сварочного тока в момент времени  $t = t_1$ .

**Регуляторы напряжения.** В регуляторах напряжения на вход измерительного устройства подается напряжение, снимаемое с электродов сварочной машины. Измерение падения напряжения между электродами связано с определенными трудностями, заключающимися в том, что абсолютное значение  $U_{эл}$  обычно невелико и не превосходит 0,5—1,5 В. В то же время на измерительную цепь действует наводка от прохождения сварочного тока, которая складывается с измерительным напряжением и вносит определенную погрешность. Существуют методы компенсации этой наводки при помощи встречно включенного напряжения  $U_k$ , снимаемого с индуктивности, установленной в контуре сварочной машины (рис. 5.20). В результате удается в определенных пределах уменьшить погрешность измерения  $U_{эл}$ . В остальном принцип действия регулятора напряжения аналогичен работе регулятора тока.

Отличительная особенность регулятора напряжения — способность реагировать на изменение плотности тока в зоне сварочного контакта, которое может быть вызвано не только изменением величины тока, но и увеличением рабочей поверхности электродов вследствие их износа, а также шунтированием тока ранее сваренными точками. Действие последних двух возмущений можно компенсировать только регулятором напряжения. Параметры, характеризующие точность и быстродействие регуляторов напряжения, близки аналогичным параметрам регуляторов тока.

**Регуляторы мощности и энергии.** Выходное напряжение измерительного узла регулятора мощности должно быть пропорциональным произведению сварочного тока  $I_{св}$  на падение напряжения между электродами  $U_{эл}$ :

$$P = I_{св} U_{эл}. \quad (5.14)$$

Особенность регулятора — наличие устройства для перемножения напряжений, пропорциональных  $I_{св}$  и  $U_{эл}$ . Для получения сигнала, пропорционального произведению двух величин, заданных в виде



напряжений постоянного тока, используют последовательное каскадное соединение широтно-импульсного модулятора ШИМ, линейного амплитудного модулятора ЛАМ и фильтра средних значений  $\Phi$ . На рис. 5.21 показана упрощенная схема устройства, в котором ШИМ собран на транзисторе  $VT1$  и интегральном усилителе  $DA1$ , ЛАМ — на транзисторе  $VT2$ , а фильтр — на резисторе  $R6$  и конденсаторе  $C3$ . На базу  $VT1$  подаются импульсы с частотой сети, обеспечивая быстрый разряд конденсатора  $C1$ , на котором формируется пилообразное напряжение. Это напряжение подается на вход усилителя  $DA1$ , работающего в режиме компаратора. На другой дифференциальный вход этого усилителя подается напряжение  $U_{вх1}$ , пропорциональное сварочному току  $U_{вх1} = kI_{св}$ . На выходе компаратора образуются прямоугольные импульсы, длительность которых  $t$  пропорциональна  $I_{св}$ . Эти импульсы управляют амплитудным модулятором, на выходе которого формируются импульсы с длительностью, пропорциональной  $I_{св}$ , и амплитудой, пропорциональной  $U_{вх2} = kU_{эл}$ . Фильтр средних значений выделяет постоянную составляющую  $U_{вых} = kI_{св}U_{эл}$ , пропорциональную мощности.

В регуляторах энергии множительное устройство обеспечивает перемножение трех величин:  $I_{св}$ ,  $U_{эл}$ ,  $t_{св}$ . Дальнейшее использование сигналов, пропорциональных мощности или энергии, осуществляется так же, как в регуляторах тока и напряжения. Стабилизация мощности или энергии позволяет исключить влияние многих возмущений, включая износ электродов. Конструктивно эти регуляторы более сложные по сравнению, например, с рассмотренными регуляторами тока, так как содержат множительные устройства, которые должны обеспечить перемножение электрических величин с погрешностью не более 1 % за время  $t = 0,01 \div 0,02$  с.

**Регуляторы температуры и инфракрасного излучения приэлектродной области.** Температурное поле в зоне сварки — одна из основных характеристик процесса, определяющая качество сварки. В настоящее время отсутствуют технические средства для измерения температуры непосредственно в ядре свариваемой точки, поэтому в качестве регулируемой величины используют температуру приэлектродной области. Температуру измеряют термопарой 2, которую помещают в электрод 1 сварочной машины так, чтобы она касалась поверхности свариваемого материала (рис. 5.22,а).

Косвенное измерение температуры можно осуществить бесконтактным способом на основе использования датчиков ИК-излучения, устанавливаемых таким образом, чтобы в их поле зрения располагалась приэлектродная область.

Непосредственное измерение свечения участка «электрод—деталь» осуществляется с помощью специального электрода, в центральном канале которого устанавливается заподлицо с торцом электрода вставка из тугоплавкого прозрачного материала, например кварца (рис. 5.22,б). Вставка 1 связана с фотодатчиком 3 через световод 2. При сварке на поверхности заготовки возникает свечение, которое регистрируется фотодатчиком и используется для управления процессом нагрева. Стабилизаторы температуры приэлектродной области и их излучения позволяют компенсировать влияние многих возмущений, по-

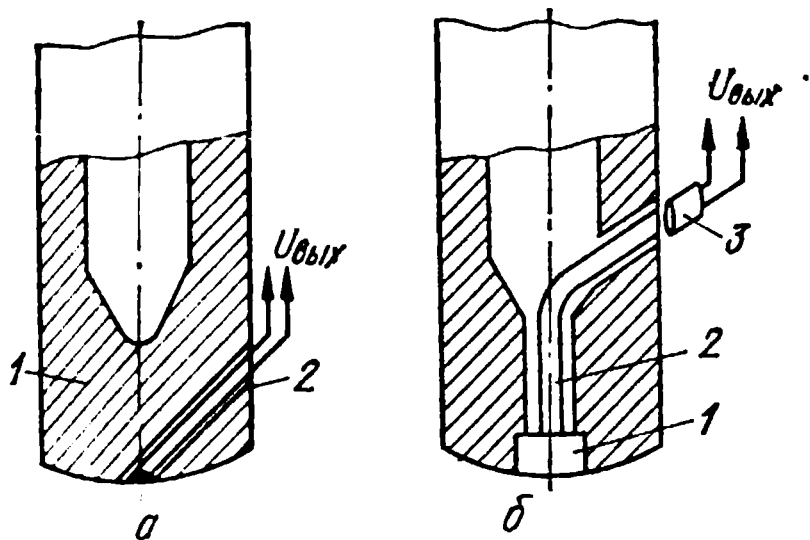
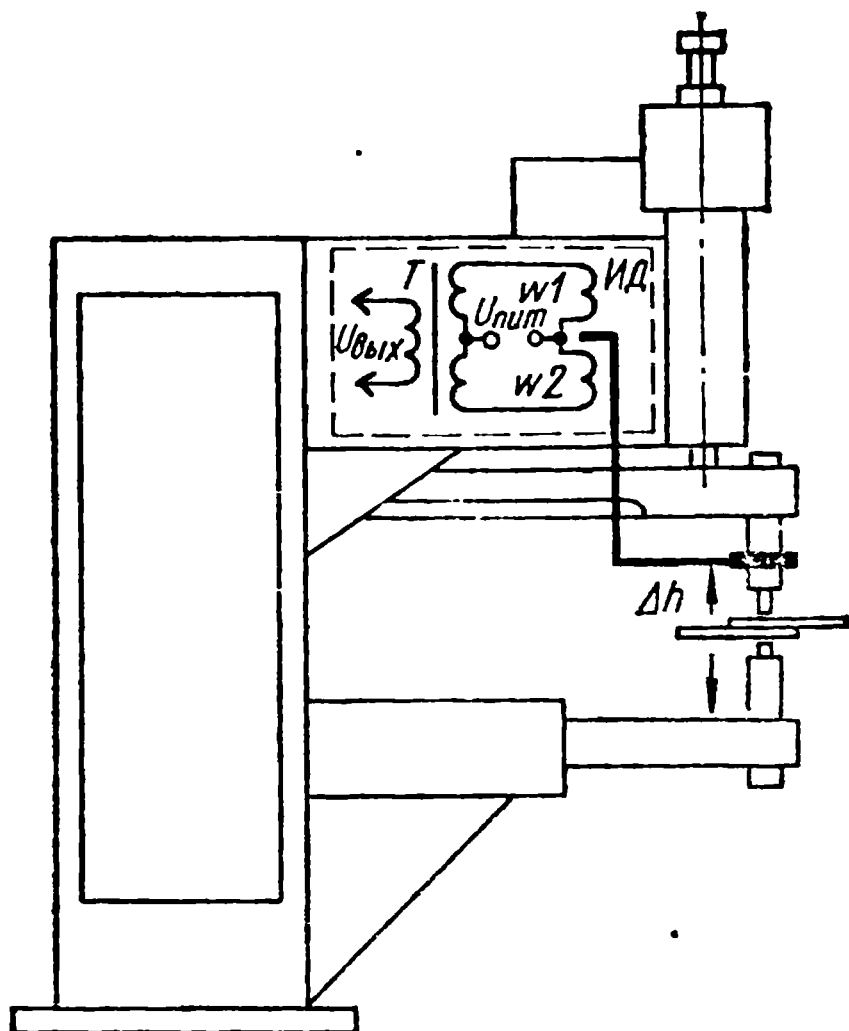


Рис. 5.22. Измерение температуры приэлектродной области:  
 а — термопарой; б — фотодатчиком

Рис. 5.23. Индуктивный датчик перемещения электродов



сколько в этих случаях регулируемые величины непосредственно связаны с качественным показателем процесса — температурным полем. Недостаток этих регуляторов — зависимость показания датчиков от степени загрязнения поверхности свариваемых деталей.

Регуляторы перемещения электродов под действием теплового расширения металла. В процессе точечной сварки в результате нагрева и последующего расплавления металла под электродами происходит местное увеличение толщины свариваемых деталей. Металл в зоне сварки расширяется и происходит раздвижение электродов сварочной машины. Этот так называемый «дилатометрический эффект» можно использовать в качестве показателя, характеризующего размер сварной точки. Между величиной перемещения электродов и объемом расплавленного металла существует взаимосвязь, которая используется при построении автоматических регуляторов. Приращение линейного размера свариваемых деталей при сварке составляет 8—10 % от их суммарной толщины.

Расширение деталей вызывает перемещение электрододержателя вместе с подвижной частью сварочной машины. Величина этого перемещения измеряется датчиком, жестко связанным с неподвижной частью сварочной машины. Подвижный элемент датчика связывается с электрододержателем. В простейшем случае для измерения перемещения используются контактные электромеханические датчики, срабатывающие при перемещении электрода на установленную величину.

В регуляторах применяется индуктивный датчик ИД, представляющий собой измеритель малых перемещений (рис. 5.23). Он состоит из двух катушек  $W1$  и  $W2$  установленных на магнитопроводах, жестко связанных с неподвижной частью сварочной машины. Катушки последовательно включены с обмотками дифференциального трансформатора  $T$ . В воздушном зазоре магнитопроводов расположен якорь, механически связанный с верхним подвижным электрододержателем. В процессе сварки этот электрододержатель под действием сил теплового

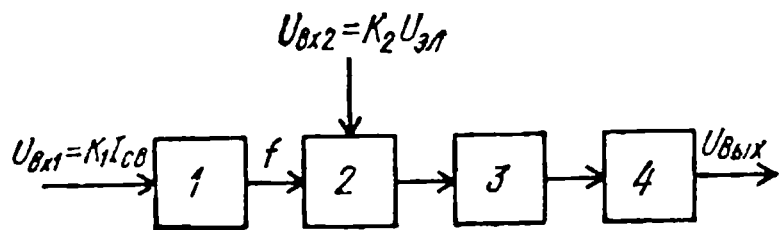


Рис. 5.24. Схема измерений сопротивления зоны сварки

ком регуляторе для управления временем протекания сварочного тока.

В некоторых случаях интерес представляет измерение не только перемещения  $\Delta h$ , но и скорости его изменения  $hd/dt$ , поскольку эта величина характеризует скорости нагрева. Для этого выходной сигнал мостовой измерительной схемы дифференцируется и подается в узел сравнения. Если под действием возмущений скорость нагрева выходит за установленные пределы, сигнал рассогласования, воздействуя на фазовращатель, изменяет величину сварочного тока таким образом, чтобы уменьшению сигнала  $dh/dt$  соответствовало увеличение тока, и наоборот. При достижении величиной перемещения  $\Delta h$  установленного значения, соответствующего оптимальному размеру ядра точки, регулятор выключает ток.

Регуляторы, построенные на использовании дилатометрического эффекта, обеспечивают компенсацию влияния основных возмущений на качество сварного соединения. Главный недостаток этих регуляторов — невозможность работы при выплесках металла, а также зависимость их точности от стабильности сил трения подвижной части машины.

**Регуляторы сопротивления.** В процессе сварки электрическое сопротивление участка цепи между электродами (зоны сварки) изменяется по сложному закону, причем к концу сварки его величина  $R_k$  меньше, чем в начале. Кроме того, для малоуглеродистых сталей кривая сопротивления имеет максимум  $R_m$ , смещенный ближе к началу нагрева. По величине конечного сопротивления или по его относительному изменению  $R_{от} = (R_m - R_k)/R_{ср}$ , где  $R_{ср}$  — среднее сопротивление за время сварки, можно судить о размерах сварной точки.

В некоторых регуляторах для увеличения помехозащищенности в качестве параметра регулирования используется интегральное значение сопротивления.

Поскольку непосредственное измерение сопротивления в процессе сварки представляет значительные трудности, используют косвенный метод, при котором отдельно измеряют падение напряжения между электродами и сварочный ток, а затем делят первое на второе, в результате чего формируется сигнал, пропорциональный величине сопротивления зоны сварки.

Устройство для выполнения операции деления двух сигналов, пропорциональных  $U_{эл}$  и  $I_{св}$  (рис. 5.24), содержит частотный 1 и амплитудный 2 модуляторы, соединенные через разделительную цепь 3 с интегратором 4. Напряжение, пропорциональное  $U_{эл}$ , подается на вход амплитудного модулятора 2, а пропорциональное току — на вход частотного модулятора 1. Выходной сигнал амплитудного модулятора имеет вид униполярных импульсов, амплитуда которых пропорциональна  $U_{эл}$ , а частота  $f$  — пропорциональна  $I_{св}$ . Раздели-

расширения перемещается вверх на величину  $\Delta h$  и изменяет индуктивное сопротивление катушек  $W1$  и  $W2$ . На выходе трансформатора  $T$  появляется сигнал рассогласования, пропорциональный  $\Delta h$ , который используется в автоматическом регуляторе для управления

тельная цепь 3 предназначена для разделения переменной и постоянной составляющих, в результате чего напряжение на ее выходе имеет вид разнополярных импульсов той же частоты. Эти импульсы подаются на вход интегратора 4, на выходе которого получается напряжение, прямо пропорциональное  $U_{эл}$  и обратно пропорциональное частоте  $f$ . Поскольку частота следования импульсов пропорциональна  $I_{св}$ , выходной сигнал схемы оказывается пропорциональным сопротивлению:

$$U_{вых} = k (U_{эл}/I_{св}). \quad (5.15)$$

Это напряжение используется для управления фазовращателем и тиристорным контактором.

**Универсальный автоматический регулятор УРТ-3.** В Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР разработан универсальный автоматический регулятор УРТ-3, предназначенный для стабилизации сварочного тока  $I_{св}$ , падения напряжения между электродами  $U_{эл}$ , ручной регулировки нагрева с автоматической стабилизацией напряжения на сварочном трансформаторе при колебаниях напряжения сети. Регулятор может работать в одном из трех указанных режимов, задаваемых переключателем, который установлен на передней панели. Основной режим работы — стабилизация  $I_{св}$  или  $U_{эл}$ . Режим ручного регулирования используется при неисправности датчика тока или напряжения. Схема и работа регулятора рассмотрены в прил. 19.

### **5.5. Управление и контроль процесса точечной сварки по математическим моделям**

**Математические модели процесса точечной сварки.** Современный уровень требований, предъявляемых к сварным соединениям, может быть удовлетворен лишь при оптимальном управлении сварочным процессом, с прогнозированием качества сварного соединения. В этом случае должно быть обеспечено такое сочетание параметров режима сварки и их изменение во времени с учетом действующих ограничений, при котором получается максимальное значение критерия оптимизации — диаметра ядра сварной точки или ее прочности.

Для успешного решения этой задачи недостаточно стабилизировать какой-либо параметр режима или изменять его по заданной программе при помощи автоматического регулятора. При оптимальном управлении необходимо использовать количественные зависимости между параметрами режима и выходными показателями качества сварки с тем, чтобы обеспечить протекание сварочного процесса в соответствии с выбранным заранее критерием оптимизации. Для этого необходимо формализовать задачу, т. е. описать процесс сварки достаточно точными математическими зависимостями. При этом объект управления заменяется математической моделью, описывающей те особенности процесса, которые существенны для управления им, и вводятся ограничения, обусловленные технологическими, экономическими и другими причинами.

Процесс точечной сварки может быть описан детерминированными математическими моделями, которые учитывают электрические, теп-

ловые и деформационные процессы при точечной сварке. Уравнения, описывающие эти процессы, получаются сложными. Поэтому использовать эти модели для контроля и управления процессом сварки пока не представляется возможным.

Рассмотрим модели, полученные на основе экспериментально-статистических методов — уравнения регрессии, связывающие параметры процесса с основными показателями качества сварки.

Наиболее характерными показателями качества точечной сварки являются диаметр ядра точки  $d_{я}$ , прочность точки при испытании на срез  $F_{ср}$  и глубина проплавления  $H$ , выраженная в процентах от толщины свариваемого изделия. Исходя из этого, математические модели процесса сварки описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} d_{я} &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n); \\ F_{ср} &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n); \\ H &= f_3(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n), \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

где  $x_1, \dots, x_n$  — параметры режима сварки ( $I_{св}$ ,  $t_{св}$ ,  $F_{сж}$ ,  $d_{эл}$  и т. д.);  $y_1, \dots, y_n$  — электрические, механические, тепловые и другие параметры, характеризующие процесс сварки (падение напряжения между электродами  $U_{эл}$ , перемещение электродов вследствие теплового расширения металла  $h_{эл}$ , температура и ИК-излучение зоны сварки, акустическая эмиссия и т. п.).

Выбирая переменные величины для использования их в модели, необходимо учитывать: насколько существенно влияние каждой из них на качественный показатель; удобство их измерения и контроля.

Рассмотрим некоторые многофакторные математические модели процесса точечной сварки сплава АМгб. В первую модель включены: сварочный ток, падение напряжения на электродах и усилие сжатия электродов, т. е.

$$d_{я} = f(I_{св}, U_{эл}, F_{сж}). \quad (5.17)$$

Во вторую модель вместо  $I_{св}$  и  $U_{эл}$  включены мощность  $Q$  либо энергия  $E$ :

$$d_{я} = f(Q, F_{сж}); \quad (5.18)$$

$$d_{я} = f(E, F_{сж}). \quad (5.19)$$

В некоторых случаях для повышения помехоустойчивости целесообразно ввести в модель вместо максимального значения тока  $I_m$  его усредненное значение за все время протекания.

При выборе модели предпочтение отдается линейным моделям, которые имеют минимальное количество членов в аппроксимирующем полиноме. Наиболее характерные математические модели, описывающие процесс точечной сварки деталей из сплава АМгб толщиной  $1 \pm 1$  мм, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} d_{я} &= 4,1x_4 + 2,8x_3 - 3,1x_4^2 - 2,9x_3^2; \\ d_{я} &= 3,72x_5 - 2,8x_5^2 - 0,15x_3^2; \\ d_{я} &= 2,1x_1 - 2,6x_3 + 4,9x_2^2 - 7,6x_1x_2 + 1,2x_2x_3, \end{aligned} \right\} \quad (5.20)$$



где

$$x_1 = \frac{1}{t_{св}} \int_0^{t_{св}} i_{св} dt; \quad x_2 = \frac{1}{t_{св}} \int_0^{t_{св}} u_{эл} dt; \quad x_3 = \frac{1}{t_{св}} \int_0^{t_{св}} F_{сж} dt;$$

$$x_4 = \frac{1}{t_{св}} \int_0^{t_{св}} U_{эл} i_{св} dt; \quad x_5 = \int_0^{t_{св}} U_{эл} i_{св} dt.$$

Уравнения (5.20) приведены в стандартизованном масштабе. Пример уравнения в натуральном масштабе запишем в виде

$$d_{я} = -6,87 - 3,98 \cdot 10^4 F_{сж} + 4,59 \cdot 10^{-2} E - 0,372 \cdot 10^{-4} E^2,$$

где  $d_{я}$  — расчетный диаметр ядра точки, мм;  $F_{сж}$  — усилие сжатия, Н;  $E$  — энергия, Дж.

Для этих моделей корреляционное отношение, характеризующее полноту связи между диаметром ядра и параметрами, входящими в (5.20),  $\eta = 0,91 \div 0,93$ . Для оценки эффективности моделей используют среднюю относительную ошибку предсказания (в %):

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{d_{я. \text{изм}} - d_{я. \text{р}}}{d_{я. \text{изм}}} 100,$$

где  $n$  — количество сваренных точек;  $d_{я. \text{изм}}$  — измеренный по макрошлифу диаметр ядра;  $d_{я. \text{р}}$  — рассчитанный по модели диаметр ядра.

Ошибку предсказания вычисляют по исходной информации, на основе которой разрабатывается математическая модель, и по информации, которая при построении модели не используется. Величина  $\varepsilon$  находится в пределах 4—6 %.

С уменьшением толщины свариваемых деталей процесс изготовления макрошлифов и последующее измерение диаметра ядра несколько усложняются. Поэтому при построении моделей за показатель качества сварки вместо диаметра ядра принимают статическую прочность сварной точки на срез  $F_{ср}$ . Например, процесс точечной контактной конденсаторной сварки заготовок толщиной 0,18±0,18 мм из никеля НП2 в области параметров  $E \pm 10\% E_{ном}$  и  $F_{сж} = \pm 15\% F_{сж. ном}$  описывается уравнением регрессии [31]

$$F_{ср} = 28,8 - 0,88F_{сж} - 0,09E^2 + 0,067F_{сж}E. \quad (5.20a)$$

Уравнение (5.20a) приведено в натуральном масштабе. Например, если  $F_{сж} = 40$  Н и  $E = 15$  Дж, то  $F_{ср} = 135$  Н.

Основное достоинство статистических математических моделей процесса сварки — учет реальных условий, при которых были получены данные для построения этих моделей. Однако при изменении условий сварки точность описания процесса снижается, что ограничивает область применения статистических моделей. Особенно существенно влияет на точность изменение толщины свариваемых деталей. Для того чтобы обеспечить требуемую точность описания процесса при изменении толщины заготовок, необходимо провести корректировку коэффициентов уравнения регрессии. Правила, по которым произ-



водится эта корректировка, основаны на физическом подобии контактной точечной сварки деталей различной толщины из одного и того же материала. Это позволяет описать процесс точечной сварки в широком диапазоне толщин материала классом изоморфных моделей. Получив известными методами статистическую модель для одного класса материалов определенной толщины и приняв ее за базовую, можно пересчитать коэффициенты регрессии для такого же материала любой другой толщины. Коэффициенты изоморфных моделей на основе базового уравнения регрессии определяются по параметрам оптимальных режимов.

При линейных членах коэффициенты для новой модели вычисляются по формуле

$$b'_i = b_i c'_{x_i}, \quad (5.21)$$

а при квадратичных

$$b'_{ii} = b_{ii} (c_{x_i})^2. \quad (5.22)$$

Свободный член при переходе от базовой модели к новой определяют по выражению

$$b' = b_0 + c'_y. \quad (5.23)$$

В формулах (5.21)—(5.23)  $c'_{x_i} = \frac{x_{i_0}}{x'_{i_0}}$ ;  $c'_y = y'_0 - y_0$ ;  $x_{i_0}$ ,  $x'_{i_0}$  и  $y_0$ ,  $y'_0$  — соответственно параметры оптимальных режимов и выходные показатели базовой и новой моделей. Сравнение моделей, полученных обычным экспериментально-статистическим методом для толщины  $\delta = 1,5 + 1,5$  мм сплава Д16АТ, и изоморфных моделей, полученных при пересчете коэффициентов базовой модели для  $\delta = 1 + 1$  мм по формулам (5.21)—(5.23), показало, что те и другие адекватно описывают процесс сварки, а средняя ошибка предсказания находится в пределах 4—5,5 %.

Таким образом, применение метода коррекции коэффициентов ускоряет процесс получения изоморфных моделей, а также упрощает аппаратуру для управления и контроля качества сварки на основе базовой модели.

Аппаратура для контроля качества сварки по математическим моделям. Устройства для контроля качества сварки по математической модели процесса содержат датчики параметров режима и процесса сварки, вычислительный блок, обеспечивающий решение уравнения регрессии в реальном времени, и блок отображения результатов расчета. Эти устройства могут быть выполнены на элементной базе аналоговой или цифровой вычислительной техники.

Аналоговые устройства отличаются сравнительной простотой схемных решений, достаточно высокой надежностью и экономичностью. Однако использование аналоговых устройств не всегда оправдано, так как в случае изменения структуры уравнения, вида входных параметров, диапазонов их регулирования требуется перестройка вычислительного блока, его дополнительные наладка и испытания, а иногда даже полная его замена. К недостаткам аналогового вычисли-

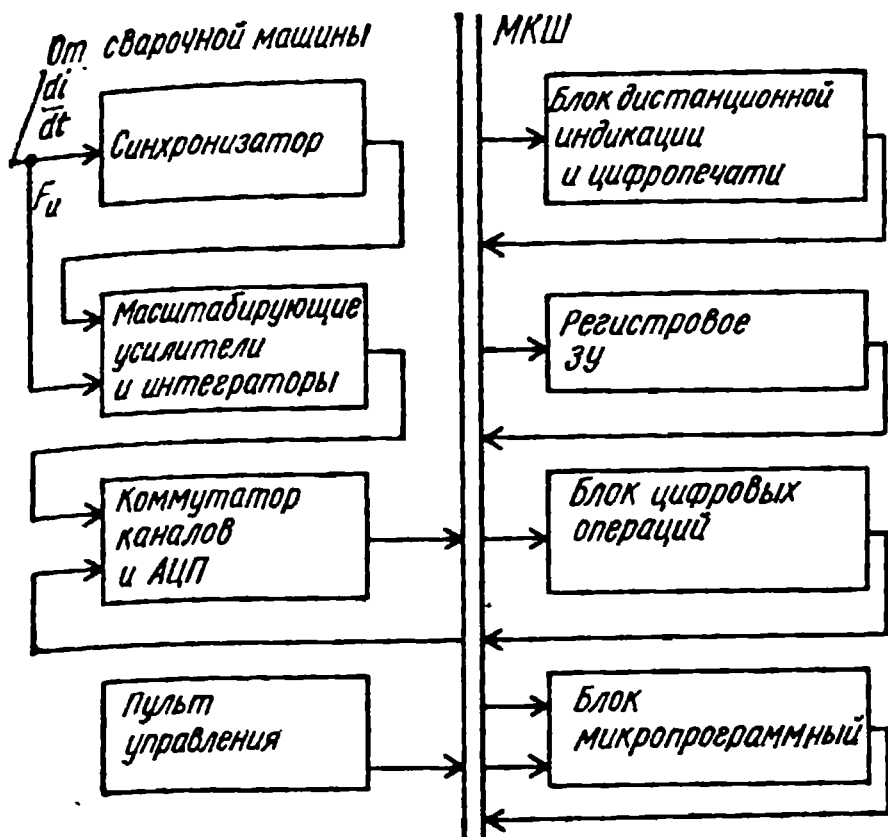


Рис. 5.25. Структурная схема устройства контроля и прогнозирования качества сварки

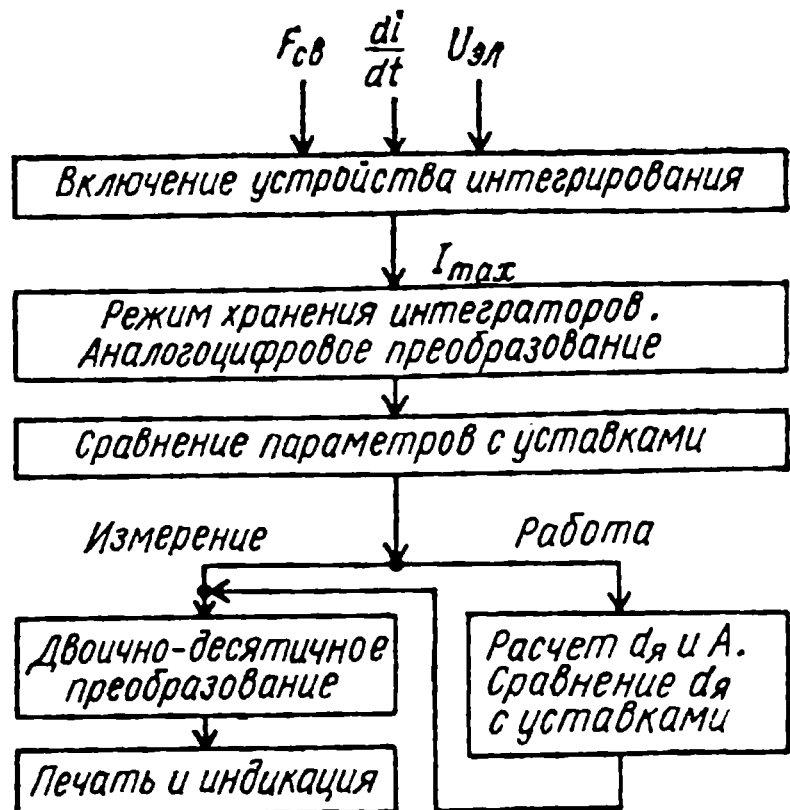


Рис. 5.26. Схема алгоритма работы устройства контроля и прогнозирования качества сварки

тельного узла относится также трудность одновременного контроля нескольких независимо работающих сварочных установок.

Цифровая вычислительная техника свободна от указанных недостатков, однако при ее использовании возникают другие трудности. Это связано с необходимостью цифрового интегрирования сигналов с погрешностью не хуже 0,1—0,2 % при измерении сварочного тока, а также при усреднении падения напряжения между электродами. Такой уровень точности требует выполнения преобразования входных сигналов в цифровую форму с большой скоростью (одно преобразование за единицы микросекунд), поэтому в состав устройств контроля и управления необходимо включать несколько быстродействующих аналого-цифровых преобразователей и накапливающих сумматоров или при одном сумматоре иметь оперативную память большого объема. Поэтому устройства контроля выполняют с применением элементов аналоговой и цифровой техники. Предварительную обработку входных сигналов целесообразно проводить в аналоговой форме (интегрирование, масштабирование и т. д.), а основные вычислительные операции, связанные непосредственно с решением уравнения — в цифровой форме при помощи специализированного или универсального процессора, входящего в состав мини-или микроЭВМ.

Структурная схема устройства контроля параметров режима и прогнозирования качества сварки с использованием специализированного процессора приведена на рис. 5.25, а схема упрощенного алгоритма работы этого устройства — на рис. 5.26 [43].

Принцип работы устройства состоит в следующем. Сигналы, пропорциональные величинам  $di_{св}/dt$ ,  $U_{эл}$ ,  $F_{сж}$ , с датчиков, установленных на сварочной машине, поступают на масштабирующие усилители-формирователи, где приводятся к стандартному для входного блока уровню с учетом толщины и марки свариваемых материалов. Далее сигналы интегрируются до момента достижения сварочным током максимума, после чего интеграторы переводятся в режим хранения информации и сигналы от них через коммутатор поступают на аналого-

цифровой преобразователь АЦП. Цифровые коды, выработанные преобразователем, через магистральные кодовые шины МКШ подаются в тот или иной блок для обработки. Порядок обработки цифровых данных, информационные связи между блоками и выработка управляющих воздействий определяются сигналами микропрограммного блока. Команды, выдаваемые этим блоком, зависят от используемого уравнения регрессии, связывающего параметры процесса сварки данного материала с выходным показателем качества.

После окончания преобразования всех данных с помощью блока цифровых операций сравниваются параметры сварочного процесса с уставками и по уравнению, хранящемуся в памяти устройства, рассчитывается диаметр ядра сварной точки. Результаты расчета индицируются в десятичной форме на электролюминесцентном табло.

Если параметры режима сварки выходят за установленные пределы, то их значения и результаты расчета регистрируются цифропечатающим устройством, одновременно выдается сигнал оператору и на краскопульт для отметки дефектной точки. В случае необходимости на печать можно выводить значения всех интересующих параметров.

В процессе переработки информации исходные числа предоставляются восьмью двоичными разрядами с погрешностью  $\pm 0,5$  единицы младшего разряда. Для этого используется девятиразрядный преобразователь и по состоянию девятого разряда проводится округление восьмого.

В устройстве контроля используется микропрограммный принцип управления с естественной адресацией микрокоманд. Микрокоманды, а также верхние и нижние предельные значения параметров, адреса условий и переходов, значения коэффициентов уравнений для расчета диаметра ядра (или глубины проплавления) и другие данные хранятся в постоянном запоминающем устройстве ПЗУ емкостью 1024 24-разрядных слова. При считывании информации из ПЗУ используется контроль по четности. При неправильно считанном слове его выполнение блокируется и вырабатывается сигнал повторного считывания; если сбой повторяется, то фиксируется отказ, выдается сигнал оператору и устройство прекращает работу.

Точность прогнозирования диаметра ядра или глубины проплавления зависит не только от точности вычислительного блока, но также и от погрешностей датчиков параметров режима сварки. При наличии ошибок измерения переменных  $\Delta x_i$  общая относительная погрешность прогнозирования

$$\delta = \frac{F'_1}{F} \Delta x_1 + \frac{F'_2}{F} \Delta x_2 + \dots + \frac{F'_j}{F} \Delta x_j + \dots + \frac{F'_q}{F} \Delta x_q,$$

где  $F = F(x_1 \dots x_q)$  — математическая модель процесса;  $x_i$  — независимые переменные;  $F'_1 \dots F'_q$  — частные производные по соответствующим независимым переменным  $x_1 \dots x_q$ . Если учесть, что  $\frac{F'(x)}{F(x)} = \frac{\partial [\ln F(x)]}{\partial x}$ , то выражение для относительной погрешности можно записать в виде

$$\delta = \frac{\partial \ln F}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial \ln F}{\partial x_j} \Delta x_j + \dots + \frac{\partial \ln F}{\partial x_q} \Delta x_q.$$

В качестве примера рассмотрим определение ошибки прогнозирования диаметра литого ядра  $d_{\text{я}}$  от погрешностей датчиков сварочного тока  $I_{\text{св}}$ , падения напряжения на электродах  $u_{\text{эл}}$  и усилия сжатия  $F_{\text{сж}}$ .

Математическая модель для рассматриваемого случая имеет вид

$$d_{\text{я}} = -b_0 - b_1 F_{\text{сж}} + b_2 Q - b_3 Q^2. \quad (5.24)$$

Представим (5.24) в виде

$$d_{\text{я}} = -b_0 - b_1 F_{\text{сж}} + b_2 (u_{\text{эл}} i_{\text{св}} t_{\text{св}}) - b_3 (u_{\text{эл}} i_{\text{св}} t_{\text{св}})^2. \quad (5.25)$$

После логарифмирования, дифференцирования по переменным  $i_{\text{св}}$ ,  $u_{\text{эл}}$ ,  $F_{\text{сж}}$  и промежуточных преобразований получим выражение для относительной ошибки прогнозирования диаметра ядра:

$$\begin{aligned} \delta = & - \frac{b_1 \Delta F_{\text{сж}}}{\Sigma} 100 + \frac{b_2 u_{\text{эл}} t_{\text{св}} \Delta I_{\text{св}}}{\Sigma} 100 - \\ & - \frac{2b_3 u_{\text{эл}}^2 t_{\text{св}}^2 i_{\text{св}} \Delta I_{\text{св}}}{\Sigma} 100 + \frac{b_2 i_{\text{св}} t_{\text{св}} \Delta U_{\text{эл}}}{\Sigma} 100 - \\ & - \frac{2b_3 i_{\text{св}}^2 t_{\text{св}}^2 u_{\text{эл}} \Delta U_{\text{эл}}}{\Sigma} 100, \end{aligned} \quad (5.26)$$

где  $\Sigma = -b_0 - b_1 F_{\text{сж}} + b_2 (u_{\text{эл}} i_{\text{св}} t_{\text{св}}) - b_3 (u_{\text{эл}} i_{\text{св}} t_{\text{св}})^2$ ;  $\Delta I_{\text{св}}$ ,  $\Delta U_{\text{эл}}$  и  $\Delta F_{\text{сж}}$  — абсолютные погрешности измерения соответствующих параметров.

Результаты расчета по формуле (5.26) показывают, что если измерить параметры режима с погрешностью 1 %, то максимальная ошибка предсказания будет равна 4,3 %. Поскольку суммарная погрешность определения  $d_{\text{я}}$  по модели из-за ошибок измерения параметров режима и неточности вычислительного блока не должна превышать 5 %, требования к точности этого блока в данном случае оказываются жесткими (0,7 %). Если же использовать датчики параметров режима более высокой точности (погрешность измерения 0,5 %), то погрешность вычисления  $d_{\text{я}}$  составит 2,4 % и, следовательно, погрешность вычислительного блока может быть 2,6 %.

Устройство контроля качества сварки можно выполнить на базе программируемого калькулятора типа «Электроника БЗ-21», который позволяет выполнять 30 различных математических операций при глубине программы в 60 шагов. Язык программирования очень прост, а операции ввода программы, ее отладки и редактирования производятся на калькуляторе с помощью клавишного пульта и дисплея на световых диодах. Поэтому смена программы при переходе на сварку другого материала и изменение различных уставок могут быть выполнены оператором в течение нескольких минут. В качестве вычислительных блоков также используются программируемые калькуляторы типа «Электроника МК-46» и «Электроника МК-64» (последний имеет встроенный аналого-цифровой преобразователь). На базе математических моделей можно создавать не только устройства контроля, но и управления процессом сварки. В последнем случае необходимо получить динамическую модель процесса, отражающую связь параметров режима с диаметром ядра в каждый текущий момент времени с дискретностью 1 период напряжения питающей сети.

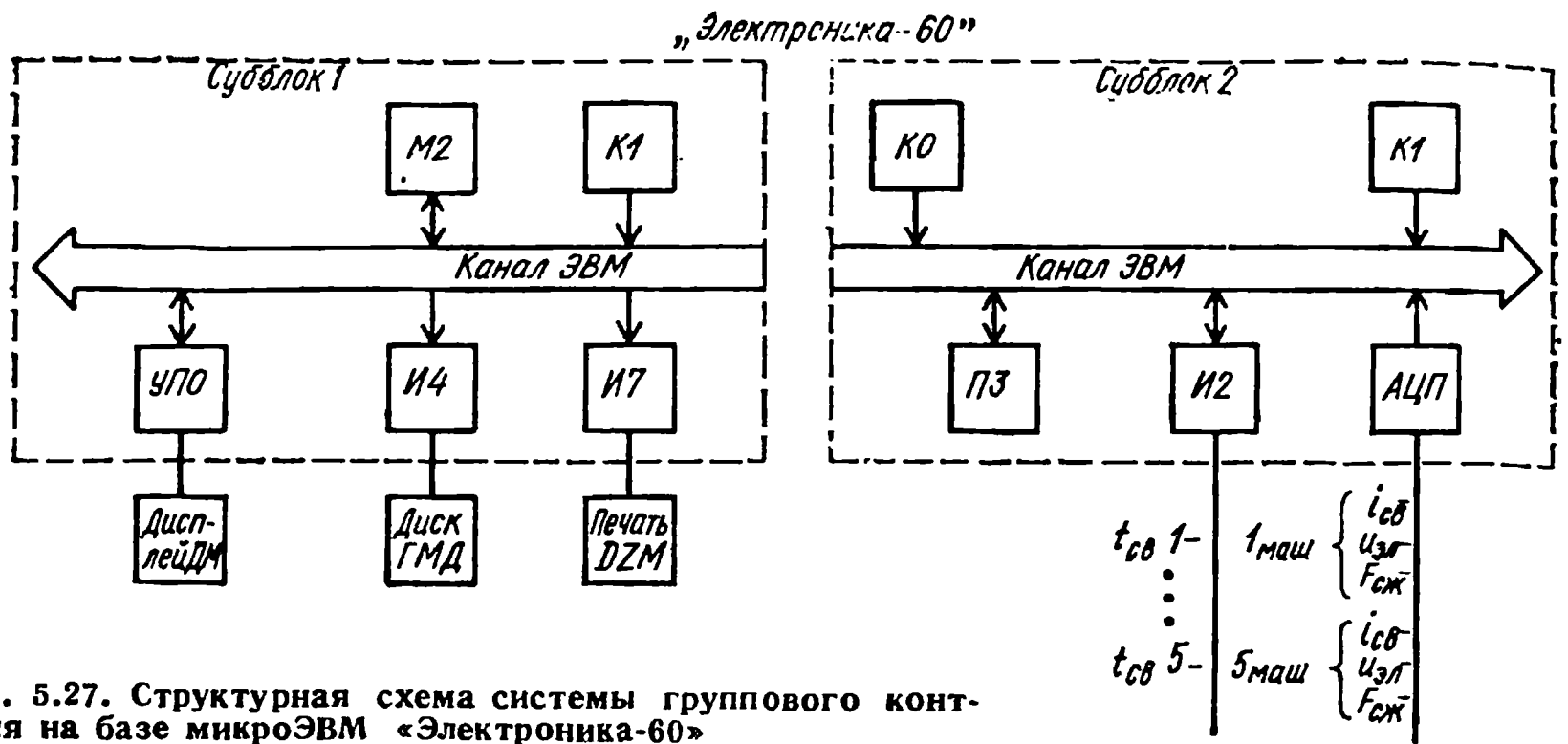


Рис. 5.27. Структурная схема системы группового контроля на базе микроЭВМ «Электроника-60»

Вычислительное устройство по динамической модели рассчитывает диаметр ядра в каждый дискретный момент времени. Далее производится сравнение расчетного диаметра ядра  $d_p$  с заранее заданным  $d_0$  (для данного момента времени) и в случае появления разности  $\Delta d = d_p - d_0$  вырабатывается управляющий сигнал, корректирующий параметры режима таким образом, чтобы в следующем периоде свести к минимуму величину  $\Delta d$ , а к концу времени сварки обеспечить  $\Delta d = 0$ .

Эти динамические модели позволят обеспечить заданное качество сварки независимо от действующих возмущений.

Если требуется контролировать качество сварки на нескольких сварочных машинах, объединенных в линию или выполняющих отдельные сварочные операции, то в качестве вычислительного устройства целесообразно использовать одну универсальную мини- или микроЭВМ. На рис. 5.27 показана структурная схема системы контроля для пяти сварочных машин, в которой в качестве вычислительного устройства используется микроЭВМ типа «Электроника-60». На каждой сварочной машине контролируется четыре параметра: сварочный ток, напряжение на электродах, усилие сжатия и время сварки. Эти параметры, измеряемые соответствующими датчиками, вводятся в микроЭВМ через аналого-цифровой преобразователь АЦП (параметры  $i_{св}$ ,  $U_{эл}$ ,  $F_{сж}$ ) и через устройство параллельного обмена И2 ( $t_{св}$ ). Данные обрабатываются центральным процессором М2. Система контроля, выполненная на базе микроЭВМ «Электроника-60», имеет модульный принцип построения, т. е. все функциональные блоки микроЭВМ выполнены в виде конструктивно законченных устройств (модулей), связь между которыми осуществляется через единый канал обмена информацией. Поскольку связь между отдельными элементами системы (например, оперативной памятью и внешними устройствами) происходит через канал одинаково, все устройства, подключенные к каналу, доступны для центрального процессора, конфигурация системы определяется в зависимости от требований, предъявляемых к системе, количества обслуживаемых сварочных машин, видов входных и выходных сигналов (аналоговые или дискретные), способов отображения, ввода и вывода информации.



Система, показанная на рис. 5.27, содержит следующие устройства и модули: центральный процессор *М2* с оперативным запоминающим устройством емкостью 4К16-разрядных слов, устройство последовательного обмена *УПО* для связи с дисплейным модулем *ДМ*, интерфейс накопителя на магнитных дисках *И4* и накопитель на гибких магнитных дисках *ГМД*, интерфейс печатающего устройства *И7* и мозаичное печатающее устройство типа *DZM-180*, оперативное запоминающее устройство *ПЗ* емкостью 16К слов, устройство параллельного обмена *И2*, аналого-цифровой преобразователь *АЦП*, коннекторы *К1* и *К0* для связи двух субблоков.

Все модули и устройства подключаются через канал обмена информацией, который является простой, быстродействующей системой связей, соединяющей центральный процессор с памятью и внешними устройствами. Канал ЭВМ состоит из двунаправленных и однонаправленных линий связи. Связь между устройствами, подключенными к каналу, осуществляется по принципу захвата общей шины канала активным устройством. В любой момент времени одно устройство является активным, оно управляет циклами обращения к каналу, удовлетворяет требования прерывания от внешних устройств. Связь через канал асинхронная, т. е. на управляющий сигнал, передаваемый активным устройством, должен поступить сигнал пассивного устройства. Поэтому процесс обмена между устройствами не зависит от длины канала. Асинхронное выполнение операции передачи данных устраняет необходимость в тактовых импульсах. В результате этого обмен с каждым устройством может происходить с максимально возможным для данного устройства быстродействием.

В отличие от локальных устройств контроля система с использованием универсальной микроЭВМ позволяет увеличить количество обслуживаемых сварочных установок за счет наращивания модулей ввода аналоговой и дискретной информации без изменения общей структуры устройства и его математического обеспечения. Одна микроЭВМ «Электроника-60» в предельном варианте с субблоками и тремя модулями ввода аналоговой информации может обеспечить контроль 15 сварочных машин. Используемый объем памяти позволяет хранить сотни математических моделей, соответствующих различным свариваемым материалам и конфигурациям изделий.

## **5.6. Контактная стыковая сварка как объект управления и задачи ее автоматизации**

Нагрев металла при стыковой сварке происходит за счет работы тока на переходном сопротивлении электрического контакта в месте стыка.

При сварке сопротивлением свариваемые изделия предварительно сводятся до соприкосновения с определенным усилием, после чего включается ток.

Режим сварки сопротивлением определяется установочной длиной деталей, напряжением на вторичной обмотке сварочного трансформатора и усилием сжатия деталей в осевом направлении. Команды на изменение усилия сжатия и выключение тока после осадки чаще всего



подаются от конечных выключателей, устанавливаемых по ходу движения подвижного зажима машины, или реле времени.

Термический цикл при сварке сопротивлением определяется выделяющейся мощностью и временем протекания процесса. Поскольку мощность — функция напряжения на свариваемых деталях и их сопротивления, колебания напряжения и сопротивления сварочной цепи (за счет нестабильной подготовки торцов и зачистки деталей) оказывают существенное влияние на качество получаемых соединений.

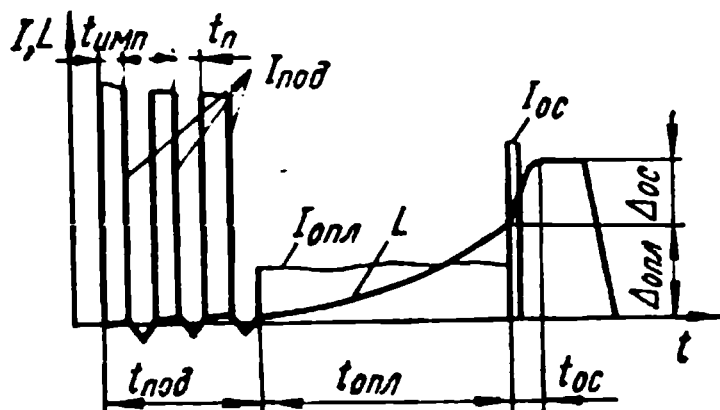
Сварку оплавлением подразделяют на сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с предварительным подогревом методом сопротивления. При *сварке непрерывным оплавлением* детали сближают с постоянной на начальном этапе или постепенно нарастающей скоростью при включенном сварочном трансформаторе. Оплавление деталей происходит в результате непрерывного образования и разрушения жидких контактных перемычек между торцами заготовок и сопровождается интенсивным выбросом частиц расплавленного металла и укорочением деталей.

Режим непрерывного оплавления определяется скоростью перемещения подвижной плиты машины  $V_n$ , вторичным напряжением холостого хода трансформатора  $U_{2x.x}$ , сопротивлением машины  $Z_{к.з}$ , вылетом деталей и припуском на оплавление  $\Delta_{опл}$ . Наибольшее влияние на формирование температурного поля в свариваемых деталях оказывают скорость  $V_n$  и напряжение  $U_{2x.x}$ . При сварке деталей с поперечным сечением до  $1000—1500 \text{ мм}^2$  величина напряжения  $U_{2x.x}$  устанавливается минимально необходимой для возбуждения оплавления и может быть принята постоянной в течение всего цикла сварки. Получение качественного соединения возможно при небольшой зоне нагрева, достигаемой за малое время при большой скорости оплавления. Поэтому требуемую зону разогрева при сварке развитых сечений можно получить только подбором соответствующей программы скорости оплавления при  $U_2 = \text{const}$ .

Для возбуждения процесса оплавления деталей с большим компактным сечением (рельсы, прокат и т. п.) требуется высокое начальное напряжение  $U_{2x.x}$ , при котором в дальнейшем по мере нагрева торцов оплавление становится прерывистым из-за больших токов. Повышение скорости оплавления в данном случае мало влияет на устойчивость процесса и приводит к увеличению выброса нагретого металла, сокращению зоны разогрева. Более целесообразно в этом случае снижать напряжение  $U_2$  по заранее установленной программе. Исследования, проведенные в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР [11], показали возможность получения достаточно большой зоны разогрева при низких скоростях подачи  $V_n = 0,2 \div 0,3 \text{ мм/с}$ , если в любой момент времени напряжение будет равно его минимально возможному значению, при котором не нарушается устойчивость оплавления. Термический к. п. д. процесса при этом наиболее высокий. Малые колебания напряжения (в пределах допустимых для электрических сетей —  $\pm 5 \%$ ) не оказывают значительного влияния на тепловой баланс, но существенны для устойчивости. Поэтому реализовать режимы оплавления на минимально возможных напряжениях  $U_2$  можно только с помощью специальных автоматических регуляторов.

Рис. 5.28. Циклограмма процесса сварки оплавлением с подогревом:

$t_{имп}$  — длительность импульса подогрева;  $t_{п}$  — длительность паузы между импульсами;  $t_{под}$  — длительность подогрева;  $t_{опл}$  — длительность оплавления;  $t_{ос}$  — длительность осадки;  $I_{под}$  — ток подогрева;  $I_{опл}$  — ток оплавления;  $I_{ос}$  — ток осадки;  $L$  — перемещение плиты машины;  $\Delta_{опл}$  — припуск на оплавление;  $\Delta_{ос}$  — припуск на осадку



При сварке оплавлением можно интенсифицировать нагрев, если уменьшить искровой зазор между деталями до определенной критической величины. Такой процесс неустойчив, он может иметь место при кратковременных повышении скорости подачи. В случае чередования периодов (импульсов) повышения скорости подачи и ее снижения происходит механическое разрушение контактов, когда они существуют в твердом состоянии, и оплавление может протекать непрерывно. Процесс импульсного оплавления получают при наложении дополнительных колебательных движений на основное поступательное движение подвижной плиты машины [11].

Режим импульсного оплавления характеризуется дополнительно формой колебательных движений (обычно близкой к синусоиде), их амплитудой и частотой. На практике в течение всего процесса сварки задают постоянными значения амплитуды (0,1—0,5 мм) и частоты (5—20 Гц) колебаний, а регулируют длительность импульсов тока, воздействуя на скорость подачи. Применяя специальные регуляторы скорости, можно значительно уменьшить длительность пауз между импульсами. Интенсивность нагрева при неизменной длительности импульсов тока соответственно возрастает. По сравнению со сваркой непрерывным оплавлением к. п. д. импульсного оплавления в два раза выше, соответственно припуск на оплавление и общая длительность процесса значительно сокращаются.

При сварке оплавлением с предварительным подогревом требуемое температурное поле получают при нагреве деталей методом сопротивления. Предварительный подогрев осуществляется чаще путем сообщения одной из деталей возвратно-поступательного движения, обеспечивающего периодическое замыкание и размыкание сварочной цепи (рис. 5.28). Вследствие периодического прерывания сварочного тока достигается выравнивание температурных полей по поперечному сечению деталей. Степень выравнивания температуры зависит от точности подготовки торцов деталей к сварке и точности установки деталей в зажимных приспособлениях машины. Параметры режима предварительного подогрева определяют температурное поле в зоне сварки к моменту перехода от подогрева к непрерывному оплавлению. Важной задачей при этом является определение момента окончания подогрева и перехода к оплавлению, так как от этого зависит ширина зоны разогретого металла и производительность процесса. Роль оплавления сводится в рассматриваемом случае к созданию слоя жидкого металла на торцах заготовок и соответствующей защитной атмосферы в искровом промежутке. Большой запас устойчивости процесса оплавления легко достигается даже на машинах с повышен-

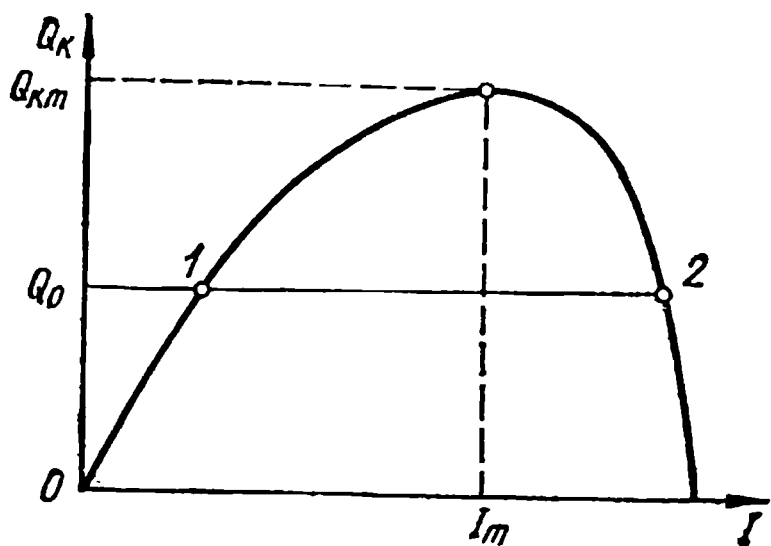


Рис. 5.29. Оценка устойчивости процесса оплавления

ным сопротивлением  $Z_{к.з}$  благодаря предварительному подогреву металла и возможности повышения напряжения  $U_2$  без существенного ущерба для качества соединений. Поэтому в машинах для сварки с предварительным подогревом управление оплавлением ограничивается изменением скорости  $V_n$  по предварительно выбранной программе без применения обратной связи по параметрам процесса.

При всех способах стыковой сварки оплавлением необходимо поддерживать устойчивость процесса. При неустойчивом оплавлении процесс может прекращаться или переходить на отдельных участках в длительные короткие замыкания торцов. В этом случае через большую часть поверхности оплавления ток не проходит и жидкий металл, покрытый пленками оксидов, успевает закристаллизоваться до осадки, что приводит к опасным дефектам в соединении. В большинстве случаев пленки представляют собой оксиды металлов и других химических элементов, содержащихся в исходном материале. Поэтому их образование непосредственно связано с окислительными реакциями, протекающими на оплавляемых поверхностях.

Расплавленные оксиды легко удаляются из стыка при осадке. Тугоплавкие оксиды удаляются из стыка вместе с жидким металлом лишь частично. Ослабить окислительные реакции на поверхности оплавления можно подбором режима сварки. Чем интенсивнее протекает оплавление, тем выше давление газов в искровом промежутке. Содержание кислорода уменьшается, оплавляемая поверхность чаще обновляется и образование оксидов ослабляется. Поэтому конечная стадия процесса оплавления характеризуется резким увеличением скорости перемещения заготовок (рис. 5.28).

Процесс оплавления устойчив, если при воздействии на него различного рода возмущений он обладает свойством самовыравнивания (саморегулирования.) Оценка условий, при которых оплавление протекает устойчиво, может быть произведена с использованием зависимости полезной мощности в сварочном контакте  $Q_k$  от тока  $I$  (рис. 5.29). Пусть каким-то определенным тепловому состоянию контакта и значению скорости оплавления соответствует мощность  $Q_0$ . При случайном увеличении количества элементарных контактов ток  $I$  должен возрасти. Если возрастание тока сопровождается увеличением мощности свыше  $Q_0$ , то это означает увеличение скорости оплавления  $V_{опл}$  по сравнению со скоростью подачи  $V_n$ , что должно привести к уменьшению проводимости элементарных контактов и снижению тока. При тех же условиях, если мощность  $Q_0$  уменьшилась, то скорость  $V_{опл}$  падает. При неизменной скорости  $V_n$  падение скорости  $V_{опл}$  приведет к прогрессивному возрастанию площади контактирования оплавляемых деталей — к короткому замыканию сварочной цепи. Поэтому режим сварки, соответствующий точке 1, можно считать устойчивым, а точке 2 — неустойчивым.

Процесс саморегулирования оплавления можно описать следующим образом. В первом приближении скорость изменения тока

$$\frac{di}{dt} = k (V_{\pi} - V_{\text{опл}}), \quad (5.27)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от теплового состояния и рельефа оплавляемых поверхностей.

Скорость оплавления пропорциональна мощности в сварочном контакте:  $V_{\text{опл}} \approx aQ_{\kappa}$ .

Выражение (5.27) представим в виде

$$\frac{di}{dQ_{\kappa}} \frac{dQ_{\kappa}}{dt} = k (V_{\pi} - aQ_{\kappa}).$$

Учитывая, что  $V_{\pi} = aQ_0$ ,

$$\frac{dQ_{\kappa}}{dt} = -\frac{k}{m} a\Delta Q_{\kappa}, \quad (5.28)$$

где  $m = \frac{di}{dQ_{\kappa}}$ ;  $\Delta Q_{\kappa}$  — отклонение мощности, равное  $Q_{\kappa} - Q_0$ .

Интегрируя уравнение (5.28), получим

$$\Delta Q_{\kappa} = \Delta Q_{\kappa}(0) e^{-(ka/m)t}, \quad (5.29)$$

где  $\Delta Q_{\kappa}(0)$  — отклонение мощности при  $t = 0$ .

Из (5.29) следует, что любое случайное отклонение самопроизвольно исчезает, если

$$m = \frac{di}{dQ_{\kappa}} > 0. \quad (5.30)$$

(Коэффициенты  $k$  и  $a$  заведомо положительные, они оказывают влияние на скорость протекания процесса, но не определяют устойчивость).

Таким образом, оплавление при жестко заданной скорости  $V_{\pi}$  может быть устойчивым, если в районе рабочей точки приращению тока соответствует приращение мощности того же знака. Область слева от максимума мощности (рис. 5.29) соответствует устойчивому оплавлению, а справа — неустойчивому. При оплавлении проводимость контакта изменяется в широких пределах, поэтому обеспечить устойчивость процесса при мощности, близкой к максимальному значению, не удастся. Среднее значение мощности в 3—5 раз меньше максимального значения. Ток  $I_m$ , соответствующий максимуму мощности  $Q_{\kappa m}$  (рис. 5.29), зависит от сопротивления короткого замыкания машины  $Z_{\kappa.з}$  и коэффициента мощности:

$$\cos \varphi_{\kappa.з} = R_{\kappa.з} / Z_{\kappa.з}, \quad (5.31)$$

где  $R_{\kappa.з}$  — активное сопротивление сварочного контура.

Можно показать, что

$$I_m = I_{\kappa.з} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \cos \varphi_{\kappa.з}}{\sin^2 \varphi_{\kappa.з}}}, \quad (5.32)$$

где  $I_{\kappa.з} = U_2 / Z_{\kappa.з}$ ;  $U_2$  — вторичное напряжение холостого хода сварочного трансформатора.

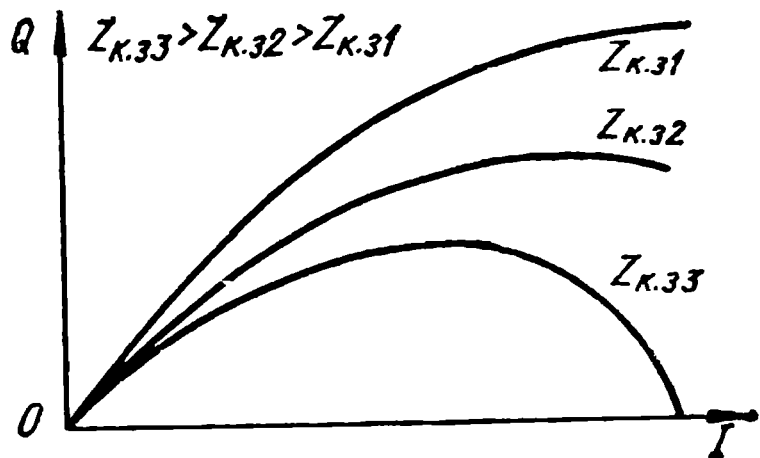


Рис. 5.30. Зависимость полезной мощности машины от тока нагрузки

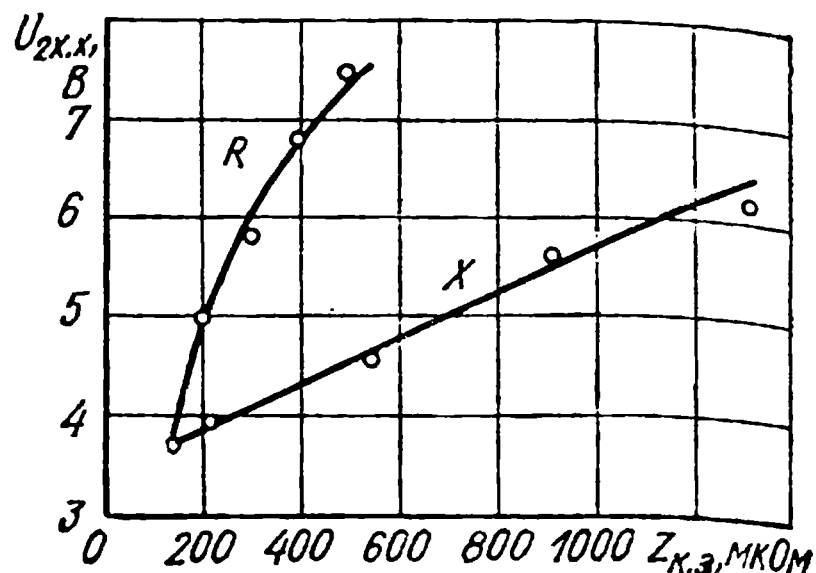


Рис. 5.31. Влияние сопротивления короткого замыкания на протяжении возбуждения оплавления ( $R$  и  $X$  — соответственно активная и индуктивная составляющие сопротивления  $Z_{к.з}$ )

В идеальных случаях при  $X_{к.з} = 0$  отношение  $I_m/I_{к.з} = 1/2$  и при  $R_{к.з} = 0$  это отношение равно  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Следовательно, на устойчивость и время переходных процессов при оплавлении существенное влияние оказывают величина и характер сопротивления сварочного контура машины. По мере увеличения сопротивления короткого замыкания машины сужается область допустимых колебаний тока и уменьшается производная  $\frac{dQ}{di} > 0$  для одного и того же значения сварочного тока (рис. 5.30). Активное сопротивление сужает область устойчивого оплавления в большей мере, чем реактивное сопротивление. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными (рис. 5.31).

Процесс оплавления прерывист по своей природе. Если перерывы в протекании тока в сварочной цепи отсутствуют, то на отдельных участках контактирующих поверхностей паузы неизбежны. Кратковременные перерывы оплавления не оказывают влияния на стабильность и равномерность нагрева металла даже при самых малых скоростях сближения деталей (0,1—0,2 мм/с). Только в конечный период оплавления, перед осадкой, длительность прерываний процесса должна быть ограничена.

Значит одно из основных требований к системе управления сварочной машиной — обеспечить наряду с устойчивостью также непрерывность процесса оплавления металла перед осадкой.

Неразъемное соединение образуется при проведении заключительной стадии процесса — осадке деталей. Для получения качественного соединения осадка деталей должна производиться за время меньше, чем время  $\Delta t$  кристаллизации тонкого слоя расплавленного металла. Интервал времени  $\Delta t$  охлаждения металла на торцах от температуры  $T_1$ , соответствующей моменту существования перемычки, до температуры  $T_2$ , при которой еще нет опасности затвердевания оксидов, можно приближенно оценить по формуле [43]

$$\Delta t \approx \frac{\delta \gamma [c (T_1 - T_2) + m]}{\lambda \frac{\partial T}{\partial x}}, \quad (5.33)$$



где  $\delta$  — толщина слоя расплавленного металла;  $\gamma, c, \lambda, m$  — соответственно плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и скрытая теплота плавления свариваемого материала;  $\frac{dT}{dx}$  — градиент температуры у торца.

Для углеродистой стали значения  $\Delta t$  не выходят за пределы сотых долей секунды и лишь в редких случаях, при широкой зоне нагрева, составляют десятые доли секунды. Из формулы (5.33) следует, что минимально допустимая скорость осадки зависит от теплофизических свойств металла и от градиента температурного поля, т. е. от ширины зоны разогрева деталей. Величина последней определяет степень пластической деформации деталей, необходимой для получения соединений требуемого качества. Значительное сужение зоны разогрева приводит к появлению включений по линии сварки, резко снижающих пластичность и прочность соединений. С другой стороны, увеличение зоны термического влияния в полтора-два раза по сравнению с оптимальной не оказывает существенного влияния на механические свойства соединений, но резко снижает к. п. д. процесса [11]. Поэтому системы управления стыковой сваркой должны обеспечивать наряду с устойчивостью и непрерывностью процесса оплавления оптимальное температурное поле в свариваемых деталях к моменту осадки.

Выполнение этих требований, не зависящих от того, производится ли нагрев деталей непрерывным оплавлением или ему предшествует предварительный подогрев деталей тем или иным способом, возможно лишь при тщательной подготовке торцов заготовок и высокой точности поддержания параметров режима. Однако в условиях производства неизбежно воздействие на процесс различного рода возмущений, приводящих к отклонению параметров режима сварки от заранее подобранных значений. К таким возмущениям относятся колебания напряжения сети, изменения сопротивления короткого замыкания машины и др. Так, в производственных условиях напряжение питающей сети не остается неизменным, а меняется в течение дня плавно или скачкообразно при включении мощных потребителей. При стыковой сварке в полевых условиях колебания напряжения сети возможны из-за ограниченной мощности передвижной электростанции. С повышением на-

пряжения увеличивается глубина кратеров на оплавляемых поверхностях и сужается зона термического влияния (рис. 5.32).

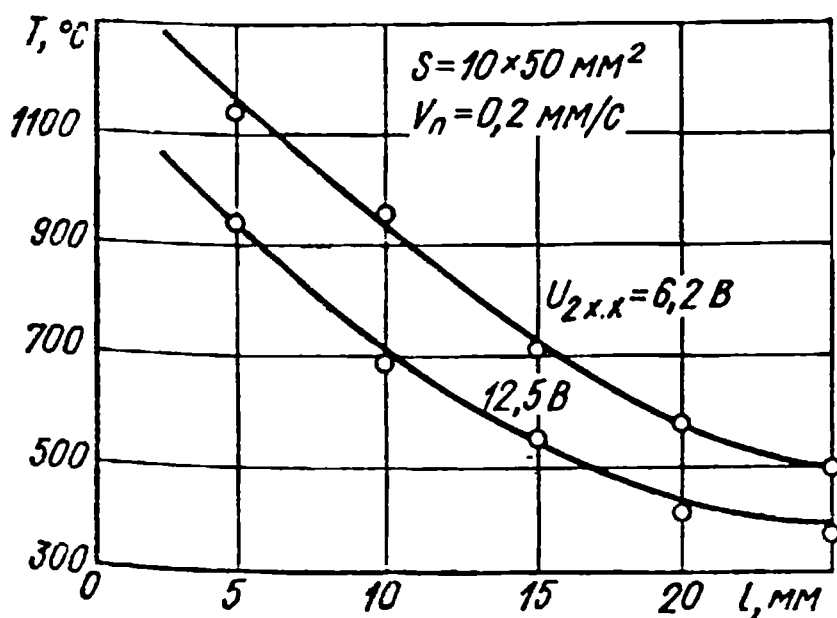


Рис. 5.32. Влияние напряжения на нагрев заготовок при оплавлении ( $l=0$  — поверхность оплавления)

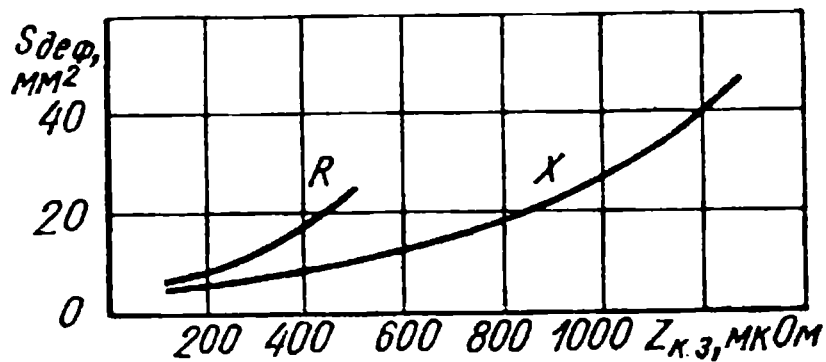


Рис. 5.33. Влияние сопротивления короткого замыкания на суммарную площадь дефектов сварного соединения ( $R$  и  $X$  — активная и индуктивные составляющие сопротивления  $Z_{к.з}$ )



При этом возможно образование оксидов металла, трудно удаляемых из стыка в процессе осадки. При чрезмерно низком напряжении оплавливание протекает неустойчиво и часто переходит в короткое замыкание цепи. Значит колебания напряжения сети влияют как на тепловую эффективность процесса оплавливания, так и на его устойчивость, а также на формирование сварного соединения.

При длительной работе сварочной машины (при больших значениях  $P_B$ ) увеличивается активное сопротивление токоведущих частей контура вследствие нагрева, особенно при нарушениях в системе охлаждения. Кроме того, активная составляющая сопротивления короткого замыкания машины изменяется с увеличением переходных сопротивлений контактов токоподводящих цепей, особенно на участке «губка—деталь» при плохой зачистке поверхностей деталей. С увеличением сопротивления машины возрастает напряжение  $U_{2xx}$ , минимально необходимое для возбуждения процесса оплавливания (см. рис. 5.31), увеличивается глубина кратеров на торцах и суммарная площадь дефектов в соединении (рис. 5.33), соответственно снижается качество сварных соединений. Наиболее опасны одновременно действующие даже небольшие отклонения нескольких параметров, если каждое из них способствует, например, снижению устойчивости процесса оплавливания или изменению требуемой величины зоны нагрева. Общее отрицательное воздействие нескольких отклонений часто приводит к дефектам в сварных соединениях.

Возмущения, наиболее опасные при контактной стыковой сварке, подразделяются на внешние и внутренние. К внешним возмущениям относятся: колебания напряжения сети; нестабильность контактных сопротивлений между электродом и деталью; нестабильность начального контактного сопротивления между деталями.

Внутренние возмущения составляют: медленные изменения сопротивления сварочного контура; возмущения, обусловленные нестабильностью пускорегулирующей аппаратуры машины, и др.

Возмущения внутреннего характера при правильном уходе за машиной оказывают значительно меньшее влияние на процесс сварки. Поэтому главная задача автоматизации процесса — компенсация влияния внешних возмущений.

## **5.7. Автоматическое управление предварительным подогревом при стыковой сварке**

При стыковой сварке с предварительным подогревом сопротивлением источники тепловыделения рассредоточены и зона разогрева охватывает почти полностью объем металла, находящегося между зажимными губками машины. Чтобы избежать возможных местных перегревов металла, подогрев производится при повторно-кратковременном протекании тока.

Прерывание тока производится вследствие разрыва сварочной цепи при возвратно-поступательном движении одной из деталей либо вследствие периодического отключения первичной обмотки сварочного трансформатора от сети. Второй способ применяется очень редко, поскольку он требует точной обработки торцов заготовок под сварку.

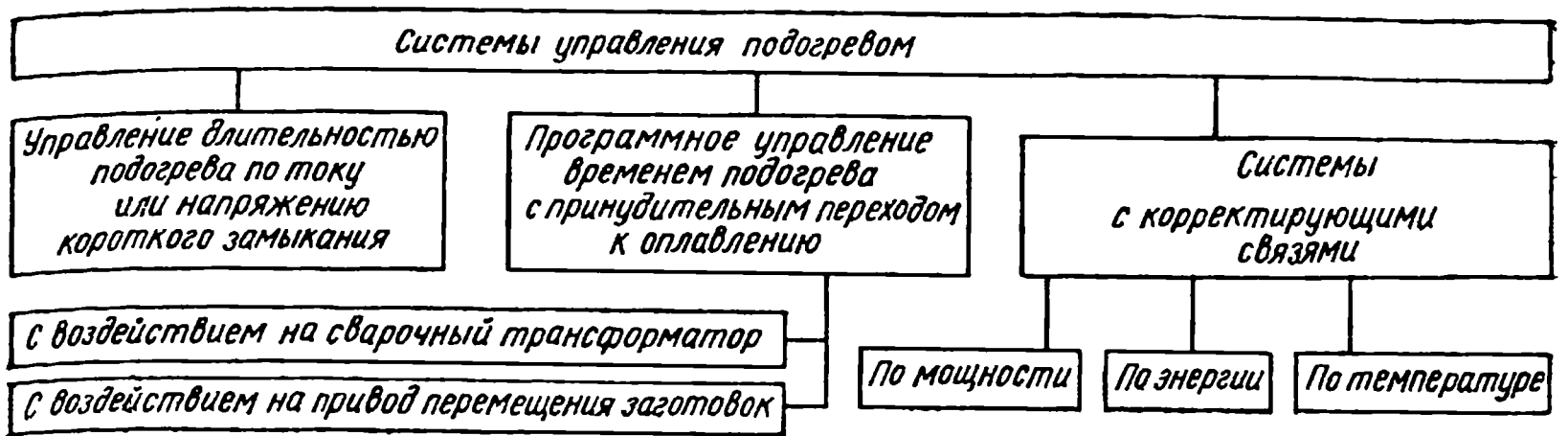


Рис. 5.34. Классификация систем управления предварительным подогревом

Классификация систем автоматического управления подогревом приведена на рис. 5.34.

**Системы первой группы.** Процесс прерывистого подогрева (см. рис. 5.28) самопроизвольно заканчивается, когда торцы заготовок разогреваются настолько, что возможно устойчивое оплавление при установленной скорости перемещения. Управление приводом возвратно-поступательного перемещения подвижной плиты машины в этом случае осуществляется на основе информации о значении тока (или напряжения) короткого замыкания торцов заготовок. В начале процесса подогрева, когда детали не разогреты и величина контактного сопротивления в моменты замыкания деталей минимальна, ток короткого замыкания имеет максимальное, а напряжение минимальное значение. По мере разогрева и оплавления торцов заготовок контактное сопротивление возрастает, что приводит к соответствующим изменениям начальных значений тока и напряжения в моменты коротких замыканий. Когда ток (или напряжение) примут установившиеся значения, соответствующий датчик (например, реле тока или напряжения с регулируемой уставкой) вырабатывает сигнал для перехода привода перемещения в режим непрерывного оплавления.

Между минимальным напряжением  $U_2$ , необходимым для оплавления деталей, энергией и параметрами сварочной цепи существует соотношение:

$$\frac{U_2^2}{eZ_{к.з}(1 + \cos \varphi_{к.з})} = \text{const}, \quad (5.34)$$

где  $e$  — удельная энергия, приходящаяся на единицу массы оплавленного металла;  $Z_{к.з}$ ,  $\cos \varphi_{к.з}$  — полное сопротивление и коэффициент мощности сварочного контура соответственно.

Из (5.34) следует, что переход от подогрева к непрерывному оплавлению может произойти при определенном соотношении между указанными величинами и зависит от колебаний сетевого напряжения. Установлено, что относительное изменение температуры

$$\frac{\Delta T_H}{T_H} = - \frac{1}{(e_{(0)}/e_H) - 1} \cdot 2 \frac{\Delta U_2}{U_{2H}}, \quad (5.35)$$

где  $T_H$ ,  $\Delta T_H$  — номинальная температура нагрева и ее отклонение;  $e_{(0)}$  — удельная энергия при  $T = 0$ .

Из (5.35) следует, что поскольку отклонения напряжения и температуры имеют противоположные знаки, повышению напряжения

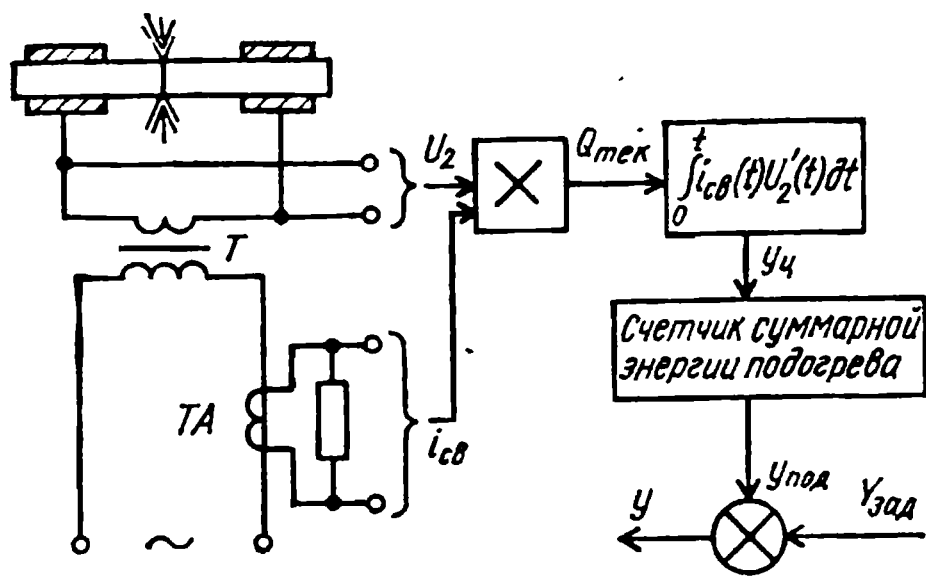


Рис. 5.35. Система стабилизации энергии при подогреве

соответствует понижению температуры, при которой происходит самопроизвольный переход к непрерывному оплавлению, и наоборот. Относительные изменения температуры могут во много раз превышать вызвавшие их изменения напряжения, особенно при низких температурах предварительного подогрева. Неточность торцовки заготовок также может привести

к возбуждению оплавления при температуре подогрева ниже предусмотренной.

**Системы второй группы.** Наибольшее распространение получили системы программного управления подогревом. Обычно программируются длительность импульсов тока короткого замыкания и пауз между ними, а также общее время подогрева. Команда на переход от подогрева к оплавлению подается счетчиком импульсов. После отработки заданного числа импульсов подогрева по сигналу счетчика происходит уменьшение скорости перемещения плиты машины, что обеспечивает гарантированный переход к режиму устойчивого оплавления.

Принудительный переход к непрерывному оплавлению возможен и без изменения скорости перемещения подвижной плиты машины, если обеспечить повышение вторичного напряжения сварочного трансформатора по окончании цикла подогрева.

Системы программного управления обеспечивают более стабильный разогрев деталей, чем системы первой группы. При колебаниях напряжения сети относительные изменения температуры равны приблизительно удвоенному относительному изменению напряжения:

$$\Delta T / \Delta T_H \approx 2 (\Delta U_2 / U_{2H}). \quad (5.36)$$

**Системы третьей группы.** Влияние колебаний напряжения сети и сопротивления сварочного контура машины на температурное поле в деталях к моменту перехода к режиму непрерывного оплавления можно уменьшить при использовании систем автоматического регулирования подогрева с обратными связями по энергии, мощности или температуре металла.

На рис. 5.35 показана система автоматической стабилизации электрической энергии при подогреве. Сигналы с трансформатора тока  $TA$  и вторичной обмотки сварочного трансформатора  $T$  после их умножения преобразуются в сигнал, пропорциональный текущему значению мощности  $Q_{тек}$ . Значение мощности  $Q_{тек}$  интегрируется, в результате чего получают сигнал  $U_ц$ , пропорциональный энергии одного цикла «замыкание—пауза». После подсчета суммарной энергии подогрева  $U_{под}$  и сравнения ее с заданным значением  $U_{зад}$  формируется команда на переход к оплавлению.

Системы третьей группы имеют общий недостаток — они не могут обеспечить формирование заданного температурного поля в деталях

в условиях действия возмущений технологического характера (качества подготовки торцов под сварку, точности установки деталей в зажимные приспособления, износа зажимных губок и т. д.). Существенное влияние технологических возмущений на процесс формирования температурного поля составляет один из основных недостатков способа предварительного подогрева сопротивлением. Подогрев методом сопротивления имеет и другие недостатки: уменьшение коэффициента мощности и электрического к. п. д. машины (отношение сопротивления деталей к полному активному сопротивлению сварочной цепи) по мере увеличения площади поперечного сечения деталей. Это приводит к тому, что с увеличением сечения необходимая мощность машины возрастает, а производительность уменьшается.

По сравнению со способом сварки непрерывным оплавлением с программным управлением напряжением и скоростью оплавления при применении предварительного подогрева сопротивлением увеличиваются потребляемая мощность в 4—5 раз, расход электроэнергии в 2—3 раза и время сварки в 1,5—2 раза. Несмотря на указанные недостатки применение предварительного подогрева сопротивлением в некоторых случаях целесообразно. Если поперечное сечение свариваемых деталей велико, а сопротивление короткого замыкания машины значительно, то без предварительного подогрева заготовок обеспечить устойчивое оплавление не удастся. Из-за особенностей теплофизических свойств цветных металлов и сплавов получить требуемую зону разогрева в деталях сечением 10000—16000 мм<sup>2</sup> непрерывным оплавлением трудно, поэтому при их сварке также применяют предварительный подогрев.

## 5.8. Программное управление процессом оплавления

Наиболее распространенное направление автоматизации процесса контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением — программирование основных параметров режима. Практически управление процессом оплавления ограничено возможностями изменения по заданной программе скорости перемещения плиты машины или вторичного напряжения. Указанные параметры могут изменяться одновременно в функции времени или пути перемещения подвижной плиты. Программирование по перемещению наиболее целесообразно в тех случаях, когда необходимо выдерживать точно заданные размеры свариваемых изделий, например, при производстве сварных колец из чистовых профилей. Возможные варианты построения систем программного управления показаны на рис. 5.36.

В практике наибольшее применение получили *разомкнутые системы программного управления (СПУ) скоростью перемещения подвижной плиты машины*. Программа перемещения задается степенной зависимостью

$$L_n = at^n, \quad (5.37)$$

где  $L_n$  — перемещение подвижной плиты при оплавлении, мм;  $t$  — длительность оплавления, с. Коэффициенты  $a$  и  $n$  определяются тепло-



Рис. 5.36. Классификация систем программного управления процессом оплавления

физическими свойствами металла и выбираются в зависимости от конечной скорости перемещения  $V_n$  и припуска деталей  $\Delta_{опл}$ .

Эти программы перемещения целесообразно применять при сварке деталей с поперечным сечением до 1000—1500 мм<sup>2</sup>, когда для получения требуемой зоны разогрева не изменяется вторичное напряжение сварочного трансформатора, а оплавление происходит с большим запасом устойчивости.

Программа перемещения чаще всего задается с помощью кулачка и определяется его профилем и скоростью вращения. Этот способ задания программы — наиболее простой, однако он имеет существенные недостатки. При сварке деталей с неровными торцами необходимая зона нагрева образуется лишь в случае, когда программа изменения скорости включается в момент начала оплавления по всему сечению деталей (длительность оплавления косины не должна входить в общее время сварки). При использовании кулачка это требование не удается выполнить. Кроме того, с изменением начального зазора невозможно задать программу перемещения плиты машины сразу же с момента возбуждения оплавления, в результате чего фактическая скорость оплавления деталей не соответствует заданному режиму. Длительная эксплуатация профильных кулачков вызывает износ рабочей поверхности и изменение заданной программы перемещения. Если необходимо изменить по программе не только скорость  $V_n$ , но и напряжение  $U_2$ , то применение кулачков еще больше осложняет наладку и эксплуатацию машины.

Более удобно использовать для программирования по перемещению различные коммутационные устройства. В машинах типа К617, К607, К340, К566, предназначенных для сварки кольцевых заготовок, поступательное движение подвижной станины через рейку и систему шестерен преобразуется во вращательное движение, которое передается на вал переключателя.

Для более точного задания закона перемещения используются различные способы электрического программирования скорости оплавления. На рис. 5.37 показана схема, построенная на операционных усилителях

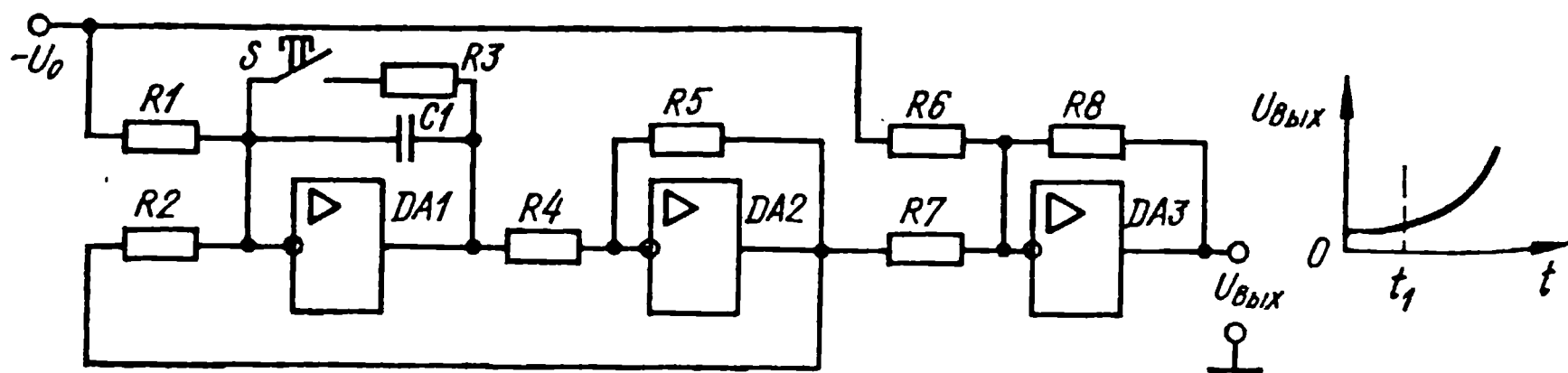


Рис. 5.37. Программирующее устройство на операционных усилителях



лителях  $DA1—DA3$ , обеспечивающая программирование необходимого изменения напряжения  $U_{\text{вых}}$  на выходе усилителя  $DA3$ , которое в дальнейшем может быть подано на схему управления электромашиным или тиристорным приводом перемещения подвижной плиты машины.

В исходном состоянии ключ  $S$  замкнут, конденсатор  $C1$  разряжен через малое сопротивление  $R3$ , и на выходе усилителя  $DA2$  напряжение отсутствует. При этом на схему управления приводом подается напряжение  $U_{\text{вых}} = U (R8/R6)$ . Подвижная плита машины перемещается с постоянной скоростью. При размыкании ключа  $S$  в момент времени  $t_1$  начинается заряд конденсатора  $C1$  через резистор  $R1$  от источника опорного напряжения  $U_0$ . На начальном (рабочем) участке напряжение на конденсаторе  $C1$  изменяется по линейному закону. Поскольку усилитель  $DA1$  охвачен положительной обратной связью через инвертор  $DA2$ , напряжение на выходе  $DA2$  и соответственно  $DA3$  будет изменяться по нелинейному закону, близкому к экспоненте.

Изменение программы напряжения  $U_{\text{вых}}$  усилителя  $DA3$  производится заданием начальных условий, постоянных времени и коэффициентов усиления операционных усилителей.

В машинах типа К355, К555, К190П для сварки рельсов и профильного проката программы изменения скорости  $V_n$  и напряжения  $U_2$  задаются с помощью реле времени, в качестве которых используются командные приборы типа КЭП-12У и МКП. Оба прибора позволяют задавать длительность операций при включении и выключении электрических цепей общим числом до 12. Применение этих устройств облегчает настройку машины при сварке различных деталей.

Для стыковых рельсосварочных машин в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР разработана цифровая система управления [28]. В ней режимы сварки вводятся в память устройства управления посредством кнопочных переключателей — коммутаторов в зависимости от типоразмера свариваемых рельсов. Дискретность считывания программы — 0,1 с. Упрощенная электрическая схема программирующего устройства системы показана на рис. 5.38. Устройство состоит из формирователя команд управления ( $DD10—DD12$ ), формирователя импульсов частотой 100 Гц (выпрямитель  $VD$ , транзистор  $VT$ ), делителя частоты ( $DD1$ ), четырехразрядного двоичнодесятичного счетчика ( $DD2, DD4, DD6, DD8$ ), дешифраторов ( $DD3, DD5, DD7, DD9$ , на выходах которых сигналы соответствуют десятым долям секунды, единицам, десяткам и сотням секунд), коммутатора и выходных триггеров  $TRS1—TRS12$ . Количество последних определяется необходимым числом команд, поступающих на исполнительные механизмы машины для воспроизведения требуемого режима сварки.

Запуск программы производится при достижении током заранее установленного значения, что позволяет исключить влияние начального зазора и косины реза на воспроизведение программы. На ее воспроизведение не влияют также и перерывы оплавления на этапе возбуждения процесса, вызванные короткими замыканиями торцов. При реверсах подвижной плиты машины на вход соответствующей схемы  $DD10$  поступает сигнал логической «1» и импульсы частотой 100 Гц с транзистора



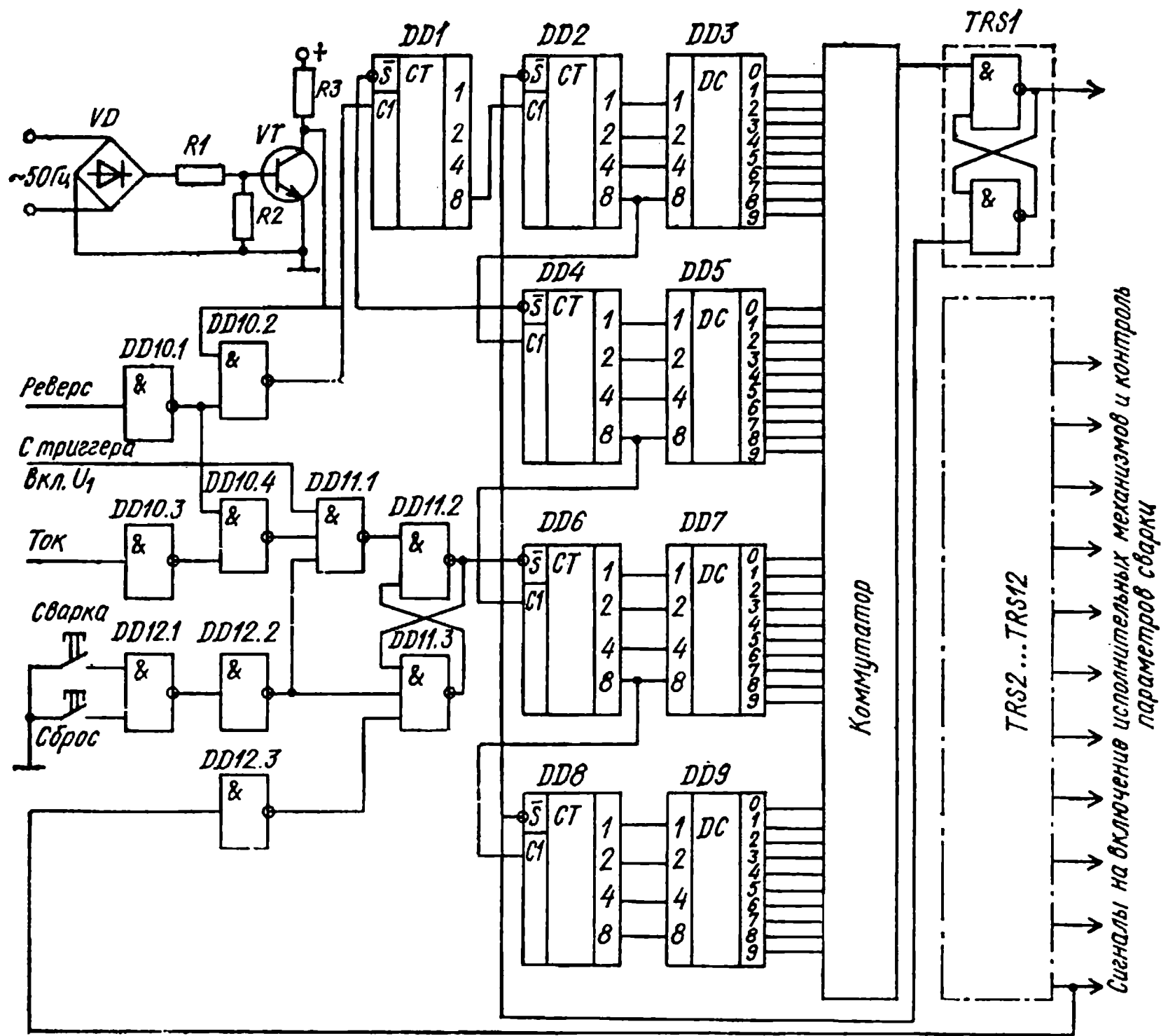


Рис. 5.38. Цифровое программирующее устройство

$VT$  на вход схемы  $DD1$  не проходят, что приводит к останову считывания программы. Возврат программирующего устройства в исходное состояние происходит после отработки всех команд по сигналу одного из выходных триггеров (на рис. 5.38 эту роль выполняет триггер  $TR S1$ ) либо при нажатии кнопки «сброс». При этом на  $S$ -входы счетчиков подаются сигналы логического «0».

В некоторых стыковых машинах с гидравлическим приводом (типа МСГА-500 и др.) программа скорости оплавления задается изменением проходного сечения гидравлического дросселя в контуре управления приводом подвижной плиты. Существенным недостатком такого программирования является то, что вследствие изменения температуры жидкости изменяется ее вязкость, а из-за всевозможных утечек давление в гидросистеме не остается постоянным, поэтому воспроизведение заданной программы происходит с большими погрешностями.

Более точное воспроизведение заданной программы скорости обеспечивается в машинах, снабженных следящим гидроприводом, т. е. гидроприводом с обратной связью по перемещению. Схема следящего гидропривода, используемого в стыковых машинах типа К190П, К355 и др., приведена на рис. 5.39. Обратная связь в приводе осуществляется золотником, в корпусе 4 которого выполнены пять цилиндрических выточек, соединяющихся штуцерами с гидросистемой машины. Центральная выточка соединена с линией нагнетания, две край-

Рис. 5.39. Схема следящего гидропривода

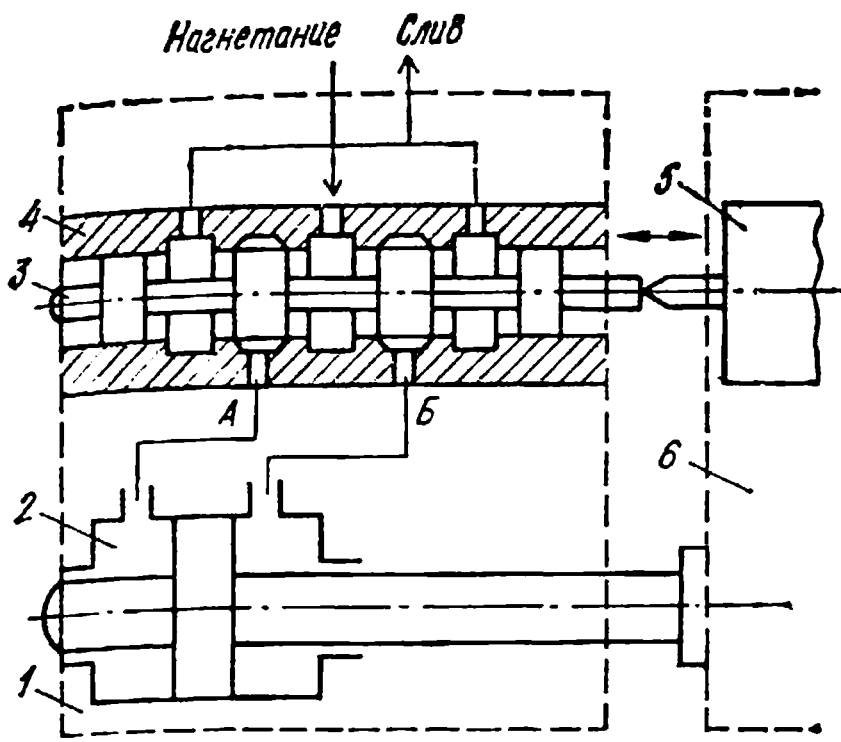
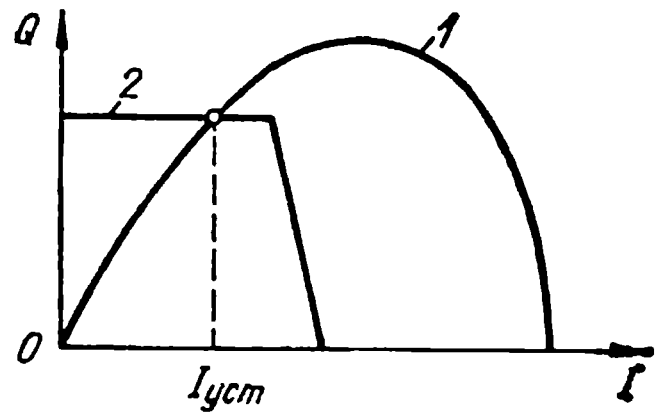


Рис. 5.40. Зависимость мощности, развиваемой машиной, %, и мощности, необходимой для оплавления деталей, от тока



ние — со сливной линией. Выточка *Б* соединена с правой полостью гидроцилиндра *2* перемещения подвижной станины (плиты) *1*, выточка *А* — с левой полостью. В нейтральном положении шток *3* рабочими поясками перекрывает выточки *А* и *Б*, поэтому доступ масла в полости гидроцилиндра перемещения перекрыт и подвижная станина машины находится в покое.

Масло подается в полости гидроцилиндра подвижной станины только при смещении штока вправо или влево от нейтрального положения. В стыковых рельсосварочных машинах шток золотника перемещается с помощью винта редуктора, установленного на неподвижной станине *6*. Одноступенчатый червячный редуктор *5* приводится во вращение управляющим двигателем малой мощности (30/70 Вт). Шток золотника копирует перемещения винта, при этом при смещении штока влево от нейтрального положения открывается доступ масла в левую полость гидроцилиндра, а правая соединяется со сливом. В этом случае подвижная станина, а вместе с ней и корпус золотника начнут двигаться влево. Если приостановить движение штока золотника влево (выключить двигатель), то корпус золотника будет перемещаться влево до тех пор, пока пояски штока не перекроют выточки *А* и *Б*, доступ масла в полость гидроцилиндра и перемещения станины прекратятся. При этом станина пройдет расстояние, на которое был сдвинут шток от нейтрального положения. При непрерывном движении штока золотника станина машины и установленный в ней корпус золотника непрерывно движутся вслед за штоком, отслеживая все его перемещения. Поэтому изменения вязкости масла или просачивание его из одной полости гидроцилиндра в другую практически не сказывается на точности слежения. Скорость движения станины задается скоростью вращения управляющего электродвигателя. Гидроприводы, используемые в машинах конструкции Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР, обладают достаточно высокими динамическими свойствами. Так, реверсирование подвижной станины машины К190П, движущейся со скоростью 0,25 мм/с, осуществляется через 0,1 с после подачи сигнала на реверс, тогда как на машине с электро-механическим приводом — через 1,0 с.

Несмотря на непрерывное совершенствование способов и аппаратуры для задания программы, применение разомкнутых систем управ-

ления не обеспечивает гарантированного качества сварных соединений при действии на процесс различных возмущений. В таких системах управляющее воздействие не зависит от непрерывно изменяющихся в процессе производства условий сварки. Лучшие результаты дает применение СПУ с корректирующими обратными связями по параметрам сварочного процесса (напряжению, току, пульсациям тока).

Корректоры скорости оплавления с обратной связью по напряжению применяют в стыковых машинах типа МС-2001, ЦСТ-200М и др. В качестве чувствительного элемента в системе используется реле напряжения, подключенное к зажимным губкам машины. При устойчивом оплавлении действующее значение напряжения на свариваемых деталях мало отличается от напряжения холостого хода сварочного трансформатора и реле остается включенным. При коротком замыкании напряжение резко падает и становится недостаточным для удержания сердечника реле, которое переключает приводной двигатель на реверс.

Закон управления для этой системы можно записать в виде

$$u_{\text{кор}} = \text{sign} [U_2(t) - \Delta], \quad (5.38)$$

$u_{\text{кор}} = 0$  при  $U_2(t) > \Delta$ ;  $u_{\text{кор}} = U_{\text{рев}}$  при  $U_2(t) < \Delta$ , где  $U_2(t)$  — текущее значение напряжения на электродах машины;  $\Delta$  — порог отпускания реле напряжения;  $U_{\text{рев}}$  — напряжение управления приводом, задающее скорость движения плиты машины при реверсе.

Коррекция скорости по напряжению не предотвращает переход оплавления в режим короткого замыкания, а только ограничивает его продолжительность. Более совершенным является корректор скорости оплавления с обратной связью по сварочному току, принцип действия которого поясняется рис. 5.40. В точке пересечения кривых мощность, развиваемая машиной 1 и мощность, необходимая для оплавления деталей 2, одинаковы, что обеспечивает устойчивое протекание оплавления. При случайном увеличении тока от установившегося значения  $I_{\text{уст}}$  мощность, развиваемая машиной, оказывается больше мощности, необходимой для оплавления. Избыточная мощность способствует ускорению нагрева и разрушению элементарных контактов и, как следствие, увеличению сопротивления искрового промежутка, что сопровождается уменьшением тока до значения  $I_{\text{уст}}$ . При токе, меньшем  $I_{\text{уст}}$ , мощность, развиваемая машиной, оказывается меньше мощности, необходимой для оплавления. Сопротивление искрового промежутка уменьшается, что приводит к восстановлению установившегося значения тока. Если зависимость, отраженную кривой 2 на рис. 5.40, использовать для задания изменения скорости подачи деталей в функции тока, то такой корректор скорости обеспечит устойчивое оплавление в условиях изменяющегося тока сварки. Принципиальная электрическая схема корректора скорости оплавления по току для стыковых машин, привод которых собран по системе генератор—двигатель, показана на рис. 5.41. На обмотке возбуждения  $L_{G1}$  генератора  $G$  (электромашинного усилителя) сравниваются напряжения  $U_0$ , соответствующее заданному значению тока, и  $U_p$ , пропорциональное фактическому значению тока, получаемое с трансформатора тока  $TA$ .

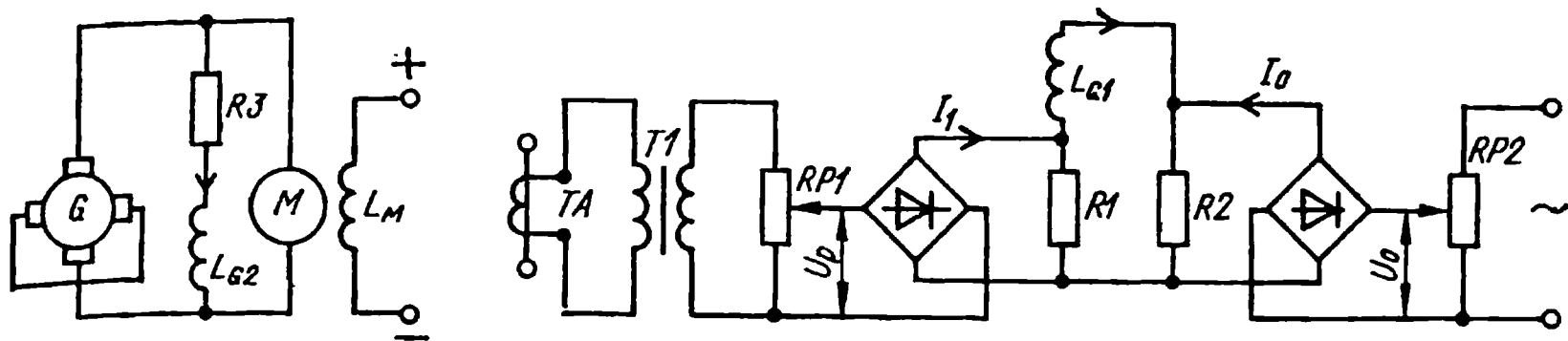


Рис. 5.41. Схема корректора скорости оплавления по току

Уравнение корректора имеет вид (без учета влияния обмотки  $L_{G2}$ , предназначенной для стабилизации частоты вращения двигателя  $M$  при измерении нагрузки на его валу):

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{\text{я}} &= k [I_1(t) - I_0 + \delta] \text{ при } [i_1(t) - I_0] > \delta; \\ \Delta U_{\text{я}} &= 0 \text{ при } [i_1(t) - I_0] \leq \delta, \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$

где  $\Delta U_{\text{я}}$  — измерение напряжения на якоре двигателя  $M$  привода перемещения подвижной плиты машины;  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $I_1(t)$ ,  $I_0$  — текущее и заданное (уставка) значения тока в первичной цепи сварочного трансформатора соответственно;  $\delta$  — зона нечувствительности схемы сравнения.

Из выражений (5.39) следует, что для нормальной работы корректора скорости необходимо постоянство среднего значения тока в течение всего времени сварки. Если же заданный режим сварки предусматривает нарастание тока перед ссадкой (кривая 1, рис. 5.42) или в течение всего времени оплавления (кривая 2), то возможны ложные команды на снижение скорости подачи деталей. Поэтому время действия корректора ограничивают моментом начала форсирования скорости перед осадкой или величину уставки  $U_0$  выбирают по максимальному значению тока оплавления. Поэтому необходимо, чтобы уровень ограничения сварочного тока смещался вместе с ростом тока оплавления, предусмотренным режимом сварки.

Схема измерительного узла корректора с самоизменяющимся уровнем ограничения сварочного тока показана на рис. 5.43,а. В этой схеме обозначения  $L_{G1}$  и  $M$  соответствуют принятым на рис. 5.41. При разработке схемы, показанной на рис. 5.43,а, принято допущение, что характер изменения тока оплавления определяется законом перемещения подвижной плиты машины и каждому значению скорости  $V_{\text{п}}$  соответствует определенное значение сварочного тока. Напряжение, пропорциональное скорости перемещения, снимается с потенциометра  $RP1$ , подключенного к якорным зажимам приводного двигателя  $M$ . По мере роста скорости оплавления автоматически изменяется величина уставки от  $U'_0$  до  $U''_0$  (рис. 5.43,б).

Записи сварочного тока и напряжения на якоре двигателя, иллюстрирующие работу корректора с автоматически изменяющейся уставкой тока при сварке труб диаметром 529 мм, приведены на рис. 5.44.

Эффективность работы корректоров скорости во многом зависит от инер-

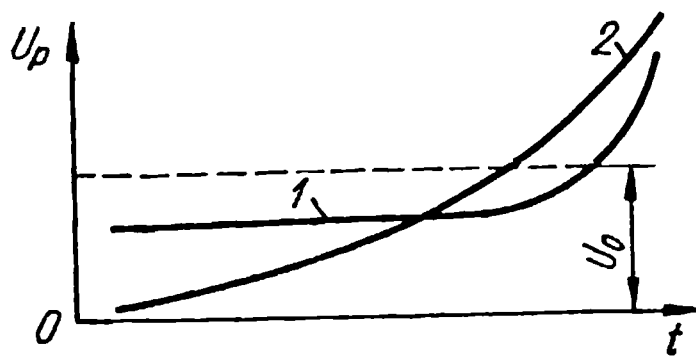


Рис. 5.42. Сигнал обратной связи по току ( $U_p$ ) при различных законах его изменения в процессе оплавления

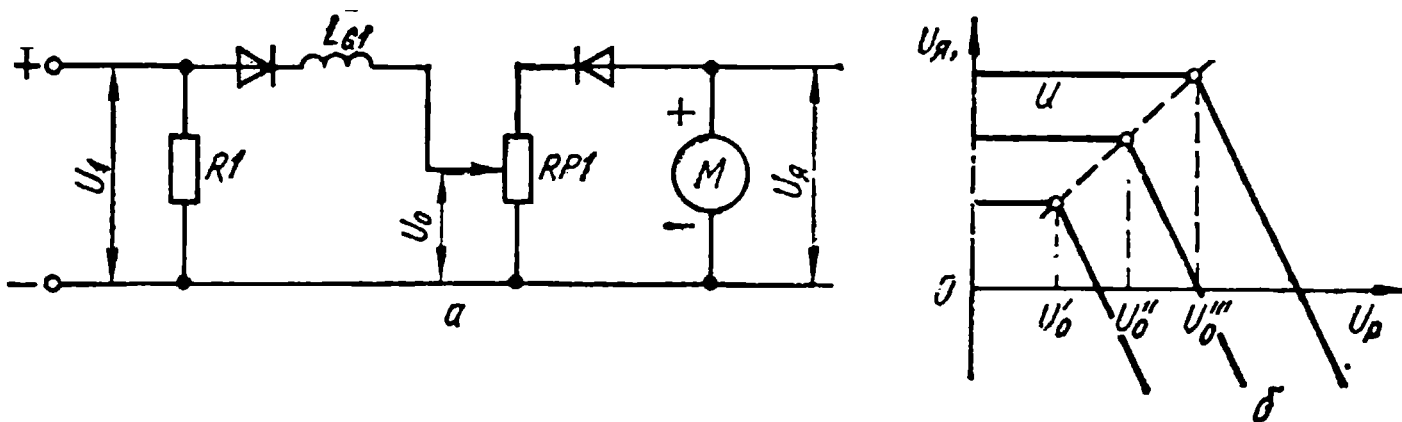


Рис. 5.43. Схема (а) и статические характеристики (б) измерительного узла корректора с автоматическим измерением уставки  $U_0$

ционности привода перемещения подвижной станины машины. Она обусловлена наличием люфтов в механизмах привода и возрастает с увеличением механической мощности привода. Поэтому быстрота восстановления устойчивого оплавления зависит не только от параметров измерительного узла корректора скорости, но и от кинематической схемы привода и массы подвижной станины машины. Тем не менее использование корректоров скорости подачи с обратной связью по току даже на обычных универсальных машинах с большим сопротивлением короткого замыкания  $Z_{к.з}$  дает значительный эффект, поскольку при этом обеспечивается одно из основных требований, предъявляемых к системе управления машиной, — устойчивость процесса оплавления. Кратковременный характер действия корректоров не приводит к заметному увеличению времени оплавления, и заданная программа перемещения практически не нарушается. Корректоры скорости позволяют также снизить приблизительно на 20 % вторичное напряжение, необходимое для возбуждения оплавления (рис. 5.45).

Регулирование напряжения  $U_2$  осуществляется контакторными схемами — переключением ступеней автотрансформатора в первичной цепи стыковой машины (кривая 1, рис. 5.46) или вентильными (тиристорными) прерывателями — изменением углов включения вентилей (кривая 2). Необходимая программа снижения напряжения  $U_2$  задается частично теми же способами и устройствами, что и программа изменения скорости оплавления. Для обеспечения устойчивости оплавления при использовании контакторных схем минимальное

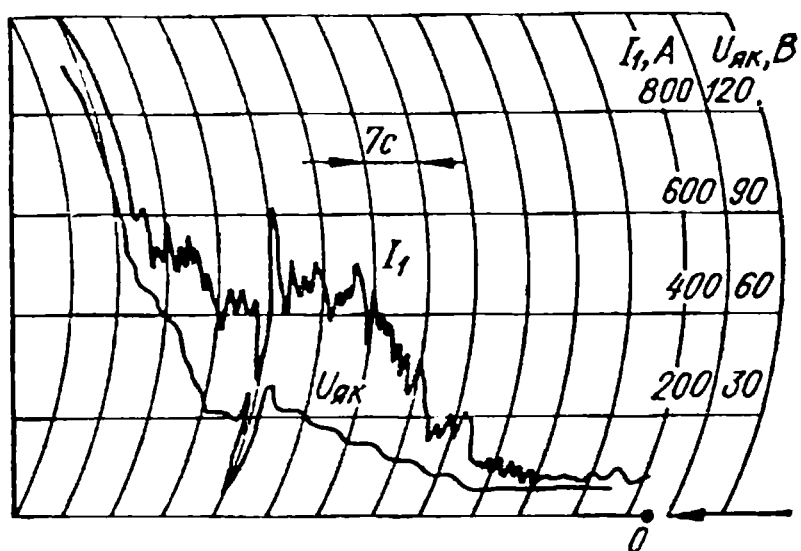


Рис. 5.44. Результаты экспериментальной оценки изменений сварочного тока  $I$  и напряжения  $U_я$  якоря двигателя привода перемещения подвижной станины машины при сварке труб  $\varnothing 529$  мм

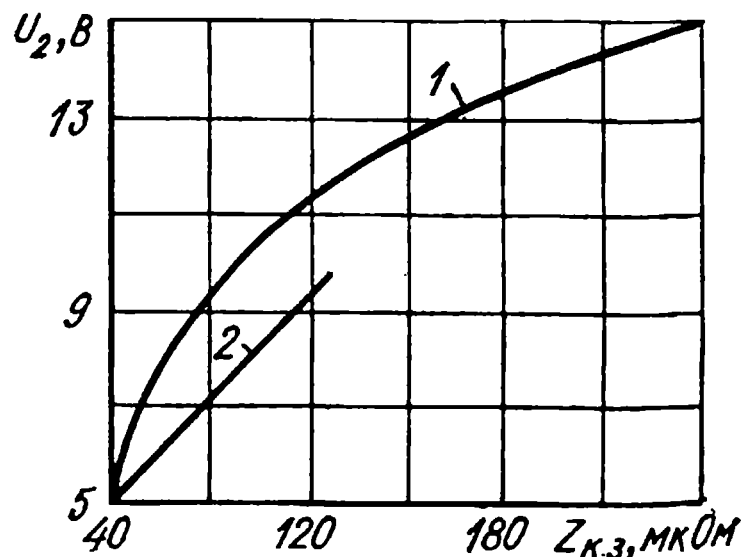


Рис. 5.45. Зависимость минимального вторичного напряжения сварочного трансформатора от внутреннего сопротивления машины при сварке:  
1 — без корректора скорости оплавления; 2 — с корректором

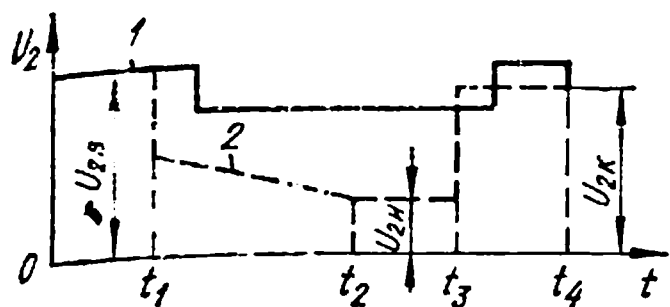


Рис. 5.46. Типовые программы изменения вторичного напряжения сварочного трансформатора:  
1 — при переключении ступеней трансформатора;  
2 — при фазовом управлении вентильным прерывателем

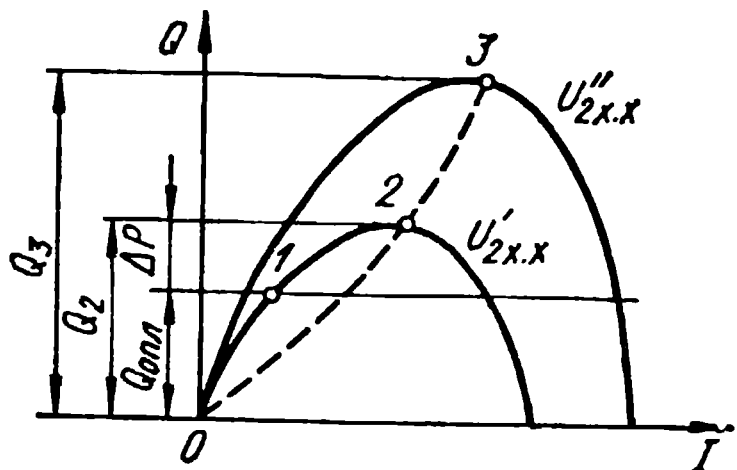


Рис. 5.47. Влияние регулятора напряжения на восстановление режима оплавления ( $U''_{2x.x} > U'_{2x.x}$ )

напряжение  $U_{2min}$ , предусмотренное программой, всегда устанавливается больше минимально возможного, и эффект от снижения напряжения уменьшается. Применение тиристорных прерывателей позволяет задавать программу с большим соотношением напряжений  $U_{2x.x}/U_{2min}$ , так как можно корректировать программу снижения напряжения в зависимости от действительного протекания сварочного процесса. Преимущество тиристорных прерывателей — стабилизация и плавное изменение напряжения  $U_2$ , а также малая инерционность.

Рассмотрим действие корректора напряжения, анализируя зависимости  $Q = f(I)$ , приведенные на рис. 5.47. При чрезмерном увеличении проводимости сварочного контакта мощность машины должна возрасти. Для этого необходимо повысить напряжение от  $U'_{2x.x}$  до  $U''_{2x.x}$ , например, уменьшая угол включения тиристорных прерывателей. Допустим, что точка 1 характеризует установившийся режим, а точка 2 — режим, соответствующий случайному увеличению проводимости сварочного контакта. Тогда при той же проводимости контакта повышенному напряжению  $U''_{2x.x}$  будет соответствовать режим, характеризующийся точкой 3. Мощность  $Q_3$  значительно больше  $Q_2$ , поэтому нагрев и разрушение контакта ускоряются и режим оплавления восстанавливается.

Принципиальная электрическая схема корректора напряжения с положительной обратной связью по току, используемая в цифровой системе управления стыковыми рельсосварочными машинами, приведена на рис. 5.48. Схема позволяет осуществить ступенчатое и плавное изменение напряжения на сварочном трансформаторе по командам, поступающим с программирующего устройства. Рассмотрим работу схемы при воспроизведении и коррекции программы изменения напряжения, изображенной на рис. 5.46 кривой 2.

Значение напряжения  $U_2$  зависит от суммы напряжений на входе операционного усилителя  $DA2$ , задаваемых потенциометрами  $RP2$ ,  $RP3$ ,  $RP4$ ,  $RP5$ . В исходном состоянии на выходе элементов (интегральных микросхем)  $DD4$  и  $DD5$  напряжение соответствует логическому «0» и тиристорный контактор в первичной цепи сварочного трансформатора выключен. В исходном состоянии на все входы схемы  $DD1$  и на вход  $S$  триггера  $DD3.1$  поступают сигналы логической «1» от устройств, контролирующих готовность к сварке основных механизмов машины. При нажатии кнопки «пуск—сварка» логическая



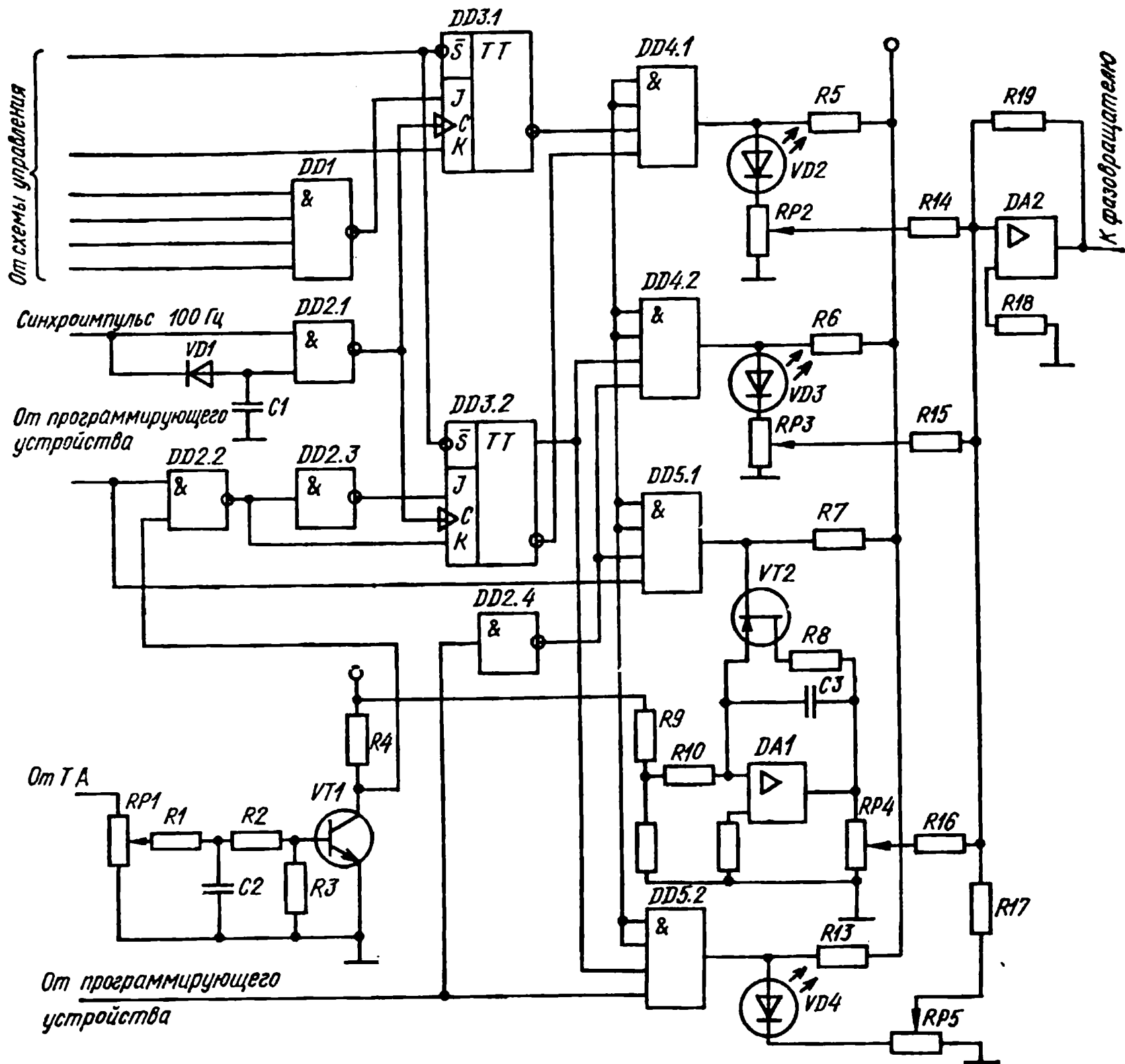


Рис. 5.48. Схема корректора напряжения с обратной связью по току

«1» поступает на вход  $K$  триггера  $DD3.1$ , что приводит к появлению на его выходе и соответственно на выходе  $DD4.1$  сигнала логической «1», который через  $DA2$  поступает на фазовращатель и тиристорный контактор. Включается высокое напряжение  $U_{2в}$  (см. рис. 5.46).

В момент времени  $t_1$  (см. рис. 5.46) с программирующего устройства на вход схемы  $DD2.2$  поступает сигнал логической «1» — команды перехода на сварку при низком напряжении  $U_{2н}$ . Триггер переключения напряжения  $DD3.2$  опрокидывается и на вход схемы  $DD4.1$  поступает «0», а на вход схемы  $DD4.2$  — «1». Если движок потенциометра  $RP3$  установлен в положение, при котором снимаемое с него падение напряжения меньше, чем снималось с  $RP2$  до переключения триггера  $DD3.2$ , то напряжение на выходе усилителя  $DA2$  ступенчато изменится. Начавшийся процесс оплавления будет протекать при пониженном напряжении источника питания. В этот же момент времени на выходе  $DD5.1$  появляется сигнал логической «1», ключ  $VT2$  закрывается, конденсатор  $C3$  начинает заряжаться и операционный усилитель  $DA1$  интегрирует входной сигнал. Поскольку падения напряжения на  $RP3$  и  $RP4$  противоположны по знаку, сварочное напряжение плавно снижается до момента  $t_2$ , который определяется временем на-

сыщени.. усилителя  $DA1$ . В дальнейшем сварка идет на низком напряжении, определяемом положением движка потенциометра  $RP4$ .

В момент времени  $t_3$ , соответствующий заключительному этапу оплавления при форсировании скорости подачи деталей, с программирующего устройства подается сигнал логической «1» на вход схемы  $DD2.4$  и один из входов схемы  $DD5.2$ . В результате сварочное напряжение ступенчато повышается до конечного значения  $U_{2к}$  (см. рис. 5.46), определяемого положением движка потенциометра  $RP5$ . Сварочный трансформатор отключается при осадке деталей в момент времени  $t_4$ , когда с программирующего устройства поступает сигнал логического «0» на один из входов схемы  $DD1$ .

Если в процессе оплавления на пониженном напряжении значение сварочного тока превышает допустимый уровень, то транзистор  $VT1$  открывается сигналом, поступающим с трансформатора тока  $TA$  на цепь  $RP1, R1—R4$ , и с коллектора  $VT1$  на один из входов схемы  $DD2.2$  подается сигнал логического «0». При этом триггер  $DD3.2$  опрокидывается, подавая напряжение логической «1» через схему  $DD4.1$  на потенциометр  $RP2$ . Напряжение переключается с низкого на высокое.

При изменении угла включения тиристоров контактора в сварочной цепи могут возникнуть длительные переходные процессы, сопровождающиеся большими бросками тока, неблагоприятно влияющими на работу управляемых вентилях и других потребителей энергии; включенных параллельно сварочной машине. Стыковая машина для источника тока представляет активно-индуктивную нагрузку с переменным коэффициентом мощности, изменяющимся в пределах от 0,9 (режим оплавления) до 0,4 (режим короткого замыкания). Напряжение переключается с низкого на высокое в произвольный момент полупериода синусоиды питающего напряжения. Поскольку угол включения вентилях может не соответствовать текущему значению коэффициента мощности, то в сварочной цепи возникают переходные процессы и ток может превысить величину тока короткого замыкания. Поэтому при поступлении команды на изменение сварочного напряжения необходимо, чтобы угол включения вентилях в первый полупериод питающего напряжения находился в пределах  $88—90^\circ$ . При этом магнитный поток трансформатора близок к нулю и переходные процессы отсутствуют.

С этой целью корректор напряжения содержит схему фазовой задержки ( $DD2.1, VD1, C1$ ) на  $88—90^\circ$  синхронизированных импульсов, формирующихся в точках перехода синусоиды через нуль и подаваемых на вход  $DD2.1$  с частотой 100 Гц. Поэтому включение сварочного трансформатора в сеть, переключения напряжения по командам программирующего устройства, а также по сигналам датчика уровня сварочного тока происходят на  $88—90^\circ$  первого полупериода напряжения сети, после чего автоматически устанавливается заданный угол включения тиристоров.

Светодиоды  $VD2—VD4$  используют для визуального контроля напряжений  $U_{2в}, U_{2н}, U_{2к}$  на различных этапах процесса оплавления (см. рис. 5.46).

Применение систем управления с корректорами скорости и напряжения дает большой технологический эффект, выражающийся в су-

ществленном повышении термического к. п. д. и устойчивости процесса непрерывного оплавления. Достигаемая при этом высокая точность воспроизведения программы изменения параметров режима сварки обеспечивает стабильность показателей качества сварных соединений.

### **5.9. Автоматизация контроля параметров режима стыковой сварки**

Качество сварных соединений можно косвенно оценивать по соответствию параметров режима сварки заданным значениям. В отличие от процессов сварки с нагревом металла методом сопротивления при сварке оплавлением какие-либо оценки по усредненным значениям параметров режима оказываются неэффективными. Поэтому необходимо располагать временными зависимостями контролируемых параметров режима, например, их записями в процессе сварки на ленту самопишущего прибора и сравнением с эталоном. При сварке с предварительным подогревом методом сопротивления ограничиваются регистрацией трех параметров — сварочного тока, перемещения подвижной плиты машины и усилия, прикладываемого к деталям в осевом направлении. По записи можно оценить: количество, величину и длительность импульсов тока при подогреве; припуск на оплавление и осадку; усилие осадки и другие параметры режима. При сварке непрерывным оплавлением наряду с указанными параметрами необходимо контролировать вторичное напряжение сварочного трансформатора и скорость подачи деталей, если они программируются.

Поэтому для регистрации параметров режима нужны многоканальные самопишущие приборы с малой инерционностью и достаточно большими скоростями протяжки ленты. Этим требованиям вполне удовлетворяют выпускаемые серийно приборы, например, типов НЗ27 и НЗ28. Они имеют встроенные усилители, позволяющие записывать слабые сигналы. Регулируемое усиление обеспечивает чувствительность от 0,02 до 5 В/см. Верхние пределы частоты измеряемых сигналов и скорости протяжки ленты — соответственно 100 Гц и 250 мм/с. Высокая разрешающая способность приборов позволяет выявить важные нарушения режима сварки, например, прерывание оплавления перед осадкой, проведение осадки без тока и др., приводящие к появлению дефектов в сварном соединении.

Чем больше параметров контролируется, тем надежнее информация о реальном ходе процесса сварки оплавлением, используемая для прогнозирования качества сварных соединений и коррекции режима сварки. Для этого нужны соответствующие измерительные преобразователи (датчики), которыми стандартные регистрирующие приборы не комплектуются. Создание высокоэффективных измерительных преобразователей параметров режима — важное условие для успешного решения задач автоматизации контроля стыковой контактной сварки.

Намагничивающая составляющая первичного тока сварочного трансформатора стыковой машины обычно невелика. Поэтому вместо тока в сварочной цепи можно производить запись первичного тока, пользуясь измерительным трансформатором тока, который подключа-

ется к входным клеммам регистрирующего прибора через выпрямитель с фильтром.

Для записи перемещения подвижной плиты используются реостатные, индуктивные и другие датчики. Реостатные датчики часто выполняются на базе круговых линейных потенциометров, например, типа ПТП, ось которых через шестерню и рейку связана с подвижной плитой машины. Передаточное число механической передачи можно

выбрать таким образом, чтобы за время сварки ось потенциометра сделала не один, а несколько оборотов. Кривая перемещения на ленте прибора в этом случае имеет пилообразную форму. Для оценки величины перемещения необходимо учитывать количество переходов через нуль. Однако точность измерения при этом значительно повышается.

Индуктивные датчики в эксплуатации надежнее реостатных. Им не нужна дополнительная механическая передача. Однако область их применения ограничена сравнительно небольшим диапазоном перемещения, в котором сохраняется линейность выходной характеристики датчика. По записи перемещения при известной скорости протяжки ленты можно оценить скорость подачи деталей на разных этапах оплавления и при осадке.

В машинах со следящим гидроприводом, управляемым от двигателя постоянного тока, о скорости оплавления можно судить по напряжению на якоре двигателя. Для этих же целей можно использовать тахогенератор, соединенный с валом электродвигателя или связанный механической передачей с подвижной плитой машины.

На рис. 5.49 приведена схема измерителя скорости, основанного на преобразовании линейного перемещения в электрические импульсы. Первичный преобразователь представляет собой мультипликатор, на выходном валу которого насажен диск  $E$  с отверстиями по окружности. С одной стороны диска установлен источник излучения  $H$ , с другой — фотодиод  $VD1$ . При вращении диска переменный сигнал с фотодиода поступает через конденсатор  $C1$  на вход операционного усилителя  $DA$  с большим коэффициентом усиления. В результате формируются прямоугольные импульсы постоянной амплитудой  $U_0$  с частотой  $f$ , определяемой скоростью вращения диска. С выхода усилителя импульсы поступают на детектор, выполненный по схеме конденсаторного частотомера ( $C3$ ,  $VD5$ ,  $VD4$ ). Значение среднего тока  $I_{cp}$ , протекающего через измерительный прибор  $A$ , определяется выражением

$$I_{cp} = U_0 (C3) f. \quad (5.40)$$

Поскольку частота следования зарядных циклов конденсатора  $C3$  линейно связана со скоростью перемещения  $V_n$ ,

$$V_n = k \frac{I_{cp}}{U_0 (C3)}. \quad (5.41)$$

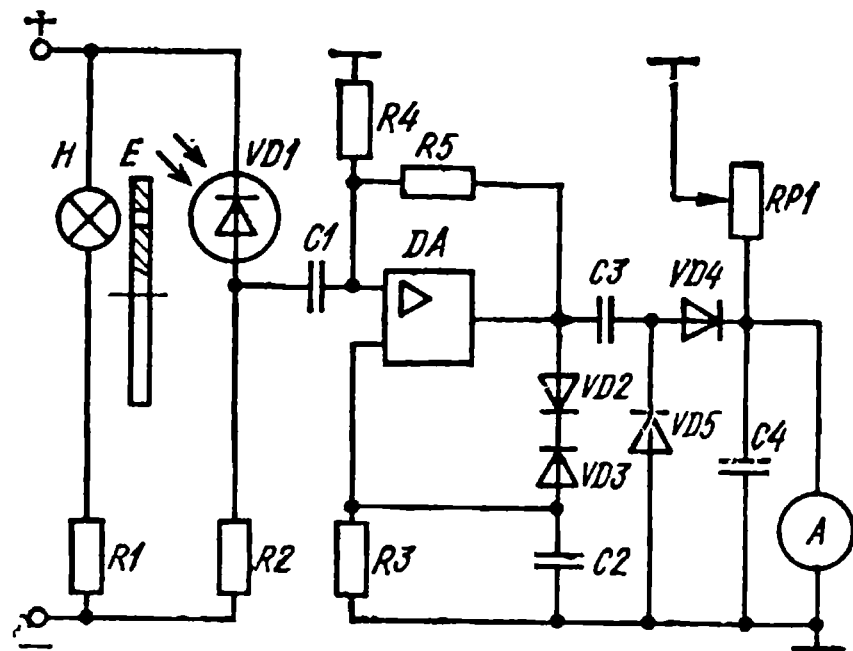


Рис. 5.49. Схема импульсного измерителя скорости

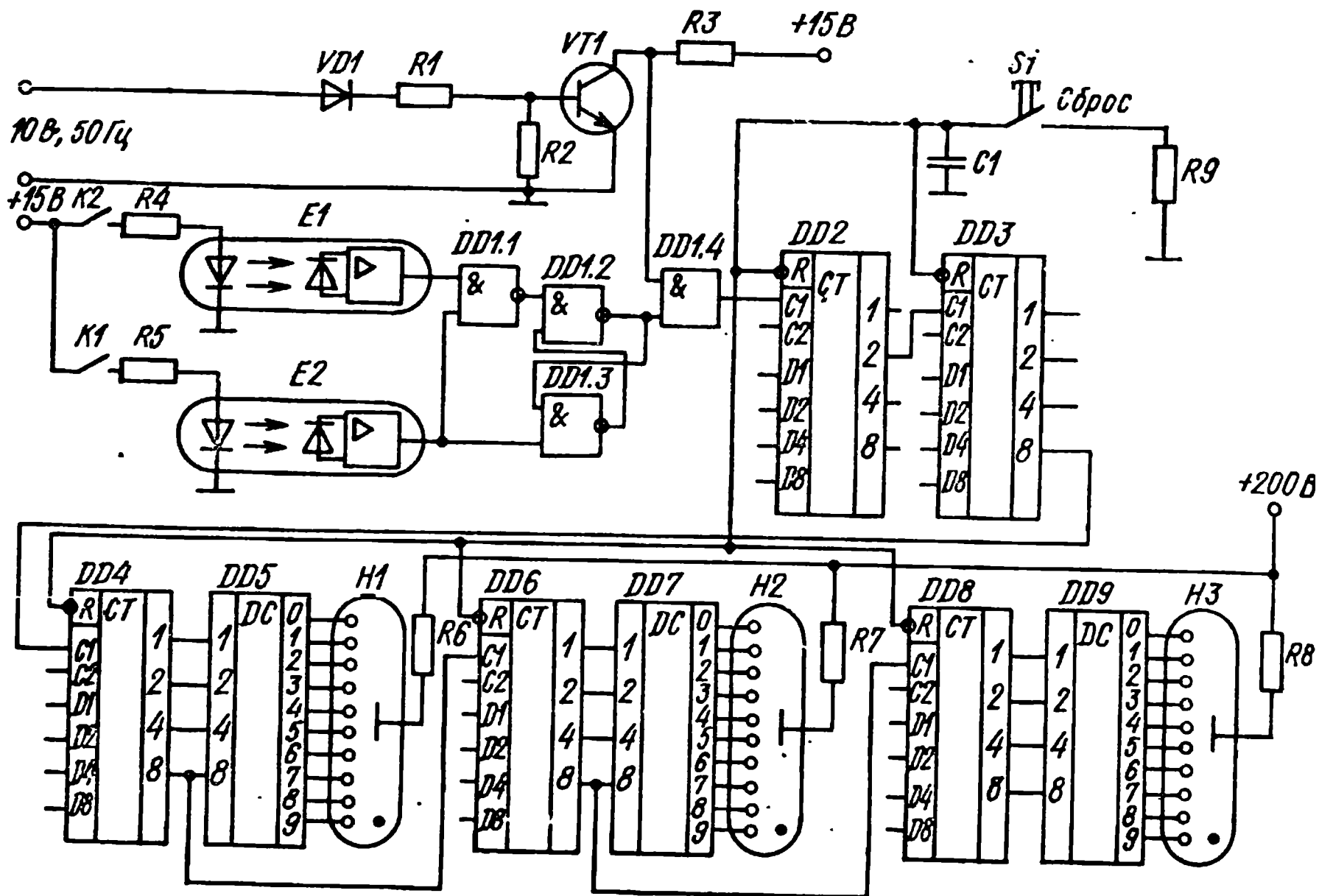


Рис. 5.50. Принципиальная электрическая схема устройства для автоматического измерения времени сварки

Датчик, использующий преобразователь (рис. 5.49), обеспечивает измерение скорости в диапазоне 0,3—30 мм/с.

При стыковой сварке с временным программированием параметров режима иногда применяют контроль длительности процесса оплавления. Диапазон изменения этого параметра достаточно велик и при сварке деталей большого сечения составляет несколько сотен секунд. На рис. 5.50 показана принципиальная электрическая схема устройства для автоматического измерения времени сварки (до 999 с) с выдачей информации на цифровые индикаторные лампы. Устройство выполнено на микросхемах серии К511 и включает в себя: формирователь тактовых импульсов частотой 50 Гц (диод  $VD1$ , резисторы  $R1—R3$ , транзистор  $VT1$ ), формирователь команд разрешения начала и конца отсчета времени (микросхемы  $DD1.1—DD1.3$ ), ключ  $DD1.4$ , делитель частоты с коэффициентом пересчета 50 ( $DD2, DD3$ ), трехразрядный двоично-десятичный счетчик ( $DD4, DD6, DD8$ ), дешифратор двоично-десятичного кода в десятичный ( $DD5, DD7, DD9$ ) и цифровые индикаторные лампы  $H1, H2, H3$ . Для повышения помехоустойчивости входные цепи устройства подключены через оптронный переключатель ( $E1, E2$ ) к контактам реле  $K1$  (реле включения сварочного трансформатора) и  $K2$  (реле наличия сварочного тока; оба реле на рис. 5.50 не показаны).

При включении источника все счетчики автоматически устанавливаются в исходное состояние благодаря нулевому потенциалу на их  $R$ -входах за счет емкости  $C1$ . Тактовые импульсы на делитель частоты не проходят, так как на выходе  $R—S$  триггера ( $DD1.2, DD1.3$ ) появляется логический «0».



При включении сварочного трансформатора состояние триггера не изменяется. Он опрокидывается только в момент появления сварочного тока (замыкаются контакты реле  $K2$ ). При этом сигнал логической «1» на выходе триггера открывает ключ  $DD1.4$  и тактовые импульсы проходят через делитель частоты на счетчик импульсов. При осадке деталей в момент отключения сварочного трансформатора триггер возвращается в исходное состояние и считывание импульсов прекращается. Информация о времени сварки сохраняется на индикаторных лампах до нажатия кнопки  $S1$  — «сброс».

В производственных условиях оператору трудно следить за показаниями регистрирующих приборов и тем более учитывать степень влияния параметров режима на качество соединения. Это привело к созданию различных устройств и приборов для автоматического контроля параметров режима сварки. Примером может служить разработанный в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР для стыковых машин со следящим гидроприводом типа К190П, К584 и др. прибор для контроля отклонений параметров режима сварки типа КОПР.

Прибор КОПР выполнен на интегральных микросхемах серии К511, К140. Он контролирует: напряжение, питающее сварочный трансформатор; непрерывность оплавления перед осадкой с отдельной сигнализацией о длительности прерывания процесса при холостом ходе или коротком замыкании; осадку свариваемых деталей; длительность осадки под током; линейную величину осадки; проскальзывание деталей в зажимах машины; общее и отбракованное количество сварных стыков.

Принцип работы прибора КОПР основан на сравнении значений контролируемых параметров с заданными (допустимыми). При этом команды на разрешение контроля выдаются схемой управления стыковой машины по мере выполнения сварочного цикла. При нарушении режима сварки прибор включает звуковую и световую сигнализацию и может блокировать цепи управления сварочной машины.

Принципиальные электрические схемы для контроля напряжения питания сварочного трансформатора, а также непрерывности оплавления перед осадкой приведены в прил. 20.

В стыковых машинах со следящим гидроприводом припуск на осадку жестко задается положением упора, ограничивающего перемещение штока следящего золотника при осадке. Если в результате осадки имеет место рассогласование перемещения штока относительно корпуса золотника, то это является признаком недостаточной осадки (меньше нормы). Если рассогласования нет, возможны два случая: осадка соответствует заданному припуску или детали проскальзывают в зажимах машины. Поэтому для обнаружения отклонения величины осадки достаточно иметь информацию о проскальзывании деталей и перемещении штока золотника относительно его корпуса. Для измерения указанных параметров используются специальные датчики.

Датчик проскальзывания электромагнитного типа (рис. 5.51) состоит из неподвижно закрепленной на его основании катушки 1, внутри которой расположен стальной сердечник 2 с профильным башмаком 3. Внутренний диаметр катушки больше диаметра сердечника на



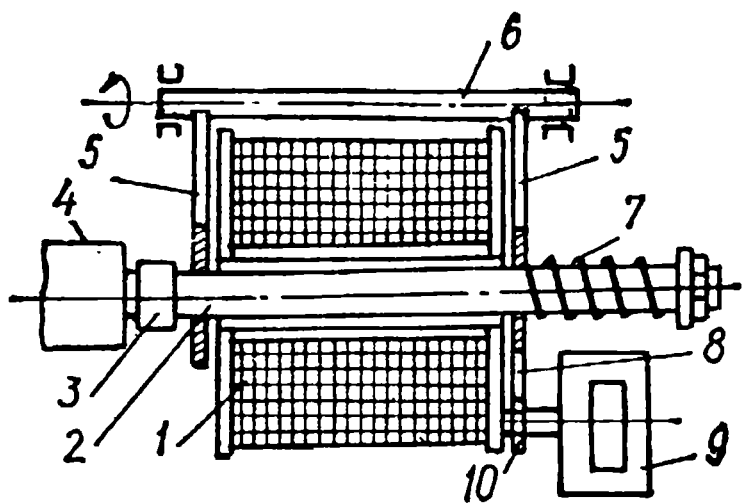


Рис. 5.51. Датчик проскальзывания

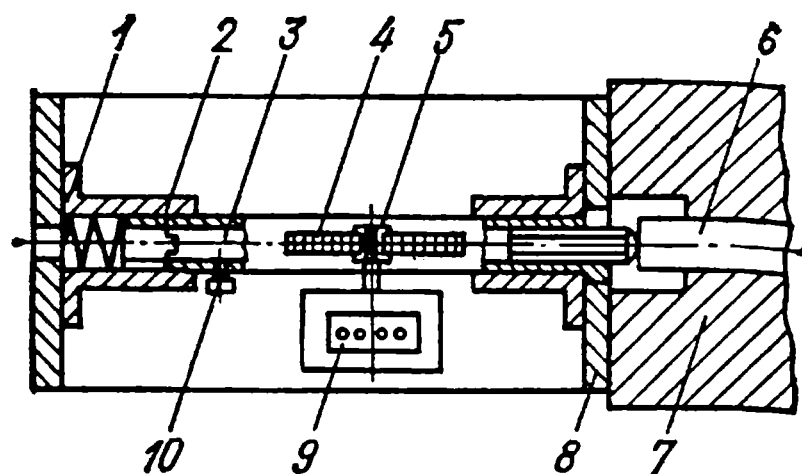


Рис. 5.52. Датчик контроля перемещения штока золотника относительно его корпуса

номинальную величину контролируемого проскальзывания. Сердечник установлен в двух направлениях П-образной кулисы 5 из немагнитного материала. Одна из направляющих снабжена зубчатым сектором 8, связанным через шестерню 10 с осью линейного потенциометра 9. При подаче напряжения на катушку сердечник прижимается профильным башмаком 3 к свариваемой детали 4. При проскальзывании вместе с деталью перемещается сердечник 2, при этом кулиса поворачивается вокруг оси 6 на угол, пропорциональный величине проскальзывания. На соответствующий угол поворачивается и ось линейного потенциометра. При отключении напряжения питания сердечник и кулиса занимают исходное положение под действием возвратной пружины 7.

Датчик рассогласования (рис. 5.52) выполнен в виде подпружиненного полого штока 2, размещенного в направляющих стаканах 1. Внутри штока на резьбе расположен регулировочный винт 3, а снаружи — нарезная рейка 4, связанная шестерней 5 с осью линейного потенциометра 9. Потенциометр и направляющие стаканы жестко установлены на основании датчика 8, который крепится к корпусу следящего золотника 7.

В исходном положении регулировочный винт устанавливается до упора со штоком золотника 6 и фиксируется стопорным винтом 10. В процессе оплавления корпус золотника копирует перемещение штока и рассогласование между ними отсутствует. В случае рассогласования после осадки деталей смещение штока золотника относительно исходного положения передается через регулировочный винт штоку датчика 2. При этом ось потенциометра поворачивается на угол, пропорциональный отклонению величины осадки.

Электрическая схема устройства контроля отклонения величины осадки по информации о проскальзывании деталей и перемещении штока золотника приведена в прил. 21.

При автоматическом контроле длительности протекания тока на этапе осадки ( $t_{ос.т}$ ) свариваемых деталей важным является выбор начала отсчета времени. Если требуемая длительность осадки под током относительно велика, порядка секунды, то за начало отсчета  $t_{ос.т}$  можно принять команду на включение осадки. В случае, когда величина  $t_{ос.т}$  составляет всего несколько периодов тока промышленной частоты, погрешность в оценке  $t_{ос.т}$  оказывается значительной вследствие инерционности механизма включения осадки.

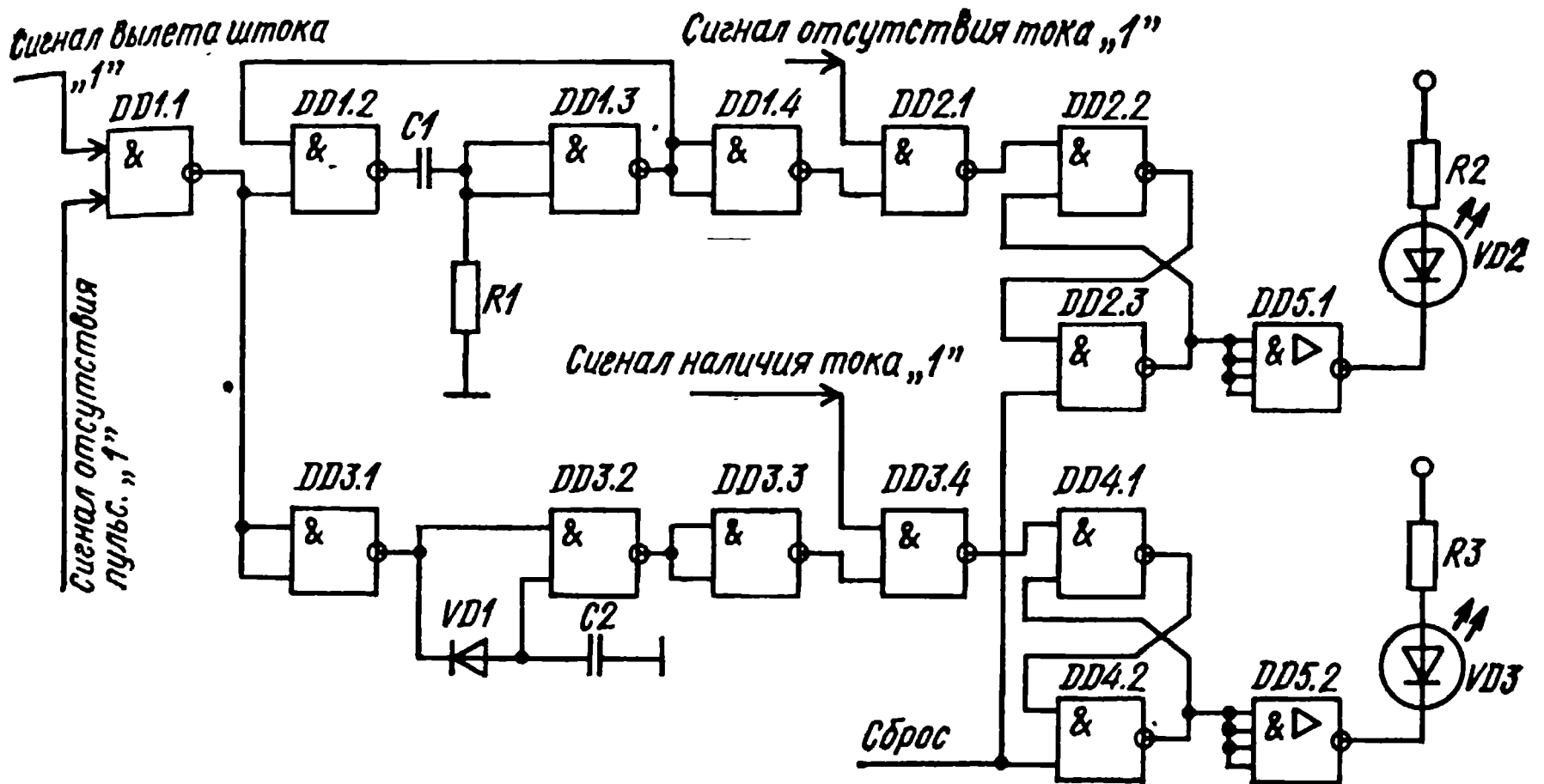


Рис. 5.53. Принципиальная электрическая схема устройства контроля длительности осадки под током

Для измерения длительности осадки под током используют электрические параметры процесса, изменение которых связано с началом пластической деформации металла при осадке, например, резкое падение напряжения на вторичной обмотке сварочного трансформатора, увеличение тока или исчезновение высокочастотных пульсаций сварочного тока в момент начала осадки деталей. Последнему параметру следует отдать предпочтение, так как при его использовании отпадает необходимость предварительного выбора уставок.

Электрическая схема устройства для контроля длительности осадки под током, в которой сигнал отсутствия пульсаций тока используется для формирования команды разрешения начала отсчета времени  $t_{ос.т}$ , показана на рис. 5.53. Устройство содержит два измерительных канала для контроля длительности осадки под током по ее минимальному и максимальному допустимому значению. Каждый из каналов состоит из последовательно соединенных задатчика временных интервалов ( $DD1.2, DD1.3, C1, R1; DD3.2, VD1, C2$ ), инвертора ( $DD1.4, DD3.3$ ), логической схемы сравнения ( $DD2.1, DD3.4$ ), элементов памяти ( $DD2.2, DD2.3; DD4.1, DD4.2$ ) и индикации ( $DD5.1, VD2, R2; DD5.2, VD3, R3$ ). Входные цепи задатчиков подключены к формирователю команды разрешения начала контроля  $t_{ос.т}$  ( $DD1.1$ ).

В исходном состоянии индикатора  $VD2$  и  $VD3$  обесточены сигналом логической «1» на выходе элементов  $DD2.1$  и  $DD3.4$  соответственно. При осадке деталей на обоих входах формирователя  $DD1.1$  появляются сигналы логической «1», в результате чего запускается одновибратор  $DD1.2—DD1.3$ . Длительность выдаваемого им импульса соответствует минимально допустимому значению  $t_{ос.т}$ . Если в течение контролируемого интервала времени произойдет отключение сварочного трансформатора, то на обоих входах элемента сравнения  $DD2.1$  будут сигналы логической «1», триггер  $DD2.2—DD2.3$  опрокинется и включится светодиод  $VD2$ . Одновременно с запуском первого начинает работать второй измерительный канал. При появлении сигнала

ла «1» на выходе инвертора *DD3.1* начинается заряд конденсатора *C2*. Время его заряда до уровня логической «1» соответствует верхнему значению допустимой длительности  $t_{ос.т}$ . Такой же сигнал появится на выходе инвертора *DD3.3*. Если длительность осадки под током превысит максимально допустимую, то на обоих входах схемы сравнения *DD3.4* будут сигналы «1», при этом опрокидывается триггер *DD4.1*, *DD4.2* и включается светодиод *VD3*.

После завершения цикла сварки в случае отклонения контролируемых параметров режима от нормы можно выключить элементы индикации подачей сигнала «сброс» (логического «0») на соответствующие входы *R—S*-триггеров.

Достоинством приборов типа КОПР является то, что они осуществляют контроль в реальном времени. Эффективность контроля можно значительно увеличить, если в системе управления стыковой машиной будут встроены элементы контроля параметров режима сварки и технического состояния оборудования. В этом случае исключается необходимость дополнительной стыковки средств контроля со схемой управления машиной и проблема совместимости их элементной базы. Рассмотренная организация автоматического контроля реализована в цифровой системе управления стыковыми машинами типа СУ-163, разработанной в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР.

Степень совершенства системы управления машиной оказывает влияние на выбор контролируемых параметров. Так, если в системе управления предусмотрена стабилизация напряжения на вторичной обмотке сварочного трансформатора, то напряжение перед сваркой не контролируется. Использование силового тиристорного контактора с цифровой системой управления позволяет с точностью до периода производить отключение сварочного трансформатора от питающей сети при осадке деталей. В этом случае длительность осадки под током не контролируют.

При стыковой сварке деталей ответственного назначения целесообразны не только вывод оперативной информации о ходе сварочного процесса на световое табло, но и печать результатов измерений параметров режима в цифровой форме в виде протокола процесса сварки. В случае сварки тонкостенных изделий, когда длительность оплавления составляет несколько секунд, достаточно регистрировать в цифровой форме конечные значения параметров режима сварки, например, припуска на оплавление и осадку, начальную и конечную скорости перемещения плиты машины, длительности коротких замыканий перед осадкой и др. При сварке изделий с большим поперечным сечением, когда напряжение и скорость изменяют по заданной программе, а длительность оплавления значительна, дополнительно необходимо регистрировать значения контролируемых параметров режима в определенные моменты сварочного цикла.

Чтобы в цифровой форме контролировать характер протекания процесса стыковой сварки оплавлением, можно использовать устройства типа СУ-150, применяемые для аналогичных целей при других видах сварки. В системе управления СУ-163 устройство контроля выполнено на базе прибора СУ-150 (см. рис. 3.26). Изменяются и регист-

№ измерения	Контролируемый параметр							
	$t_{св}$ , с	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$U_{як}$ , В ( $\times 10^{-1}$ )	$L$ , мм ( $\times 10^{-1}$ )	Прерыва- ние оплав- ления	Проскаль- зывание	Отклоне- ние осадки
1	000	377	026	249	002	0	0	0
2	040	377	214	247	078	0	0	0
3	045	257	243	234	082	0	0	0
4	084	211	259	229	168	0	0	0
5	138	211	227	240	252	0	0	0
6	146	320	289	919	318	0	0	0
7	147	000	000	000	425	0	0	1

рируются с помощью цифропечатающей машинки типа ЭУМ-23 следующие параметры: текущее значение времени сварки  $t_{св}$ , напряжение на сварочном трансформаторе  $U_1$ , сварочный ток  $I_1$ , напряжение на якоре  $U_{як}$  двигателя привода оплавления и перемещение  $L$  плиты машины (табл. 5.1). Кроме того, контролируется отклонение от заданной установки длительности прерывания процесса оплавления перед осадкой и линейной величины осадки с учетом возможного проскальзывания деталей в зажимах машины при осадке. Если отклонения этих параметров находятся в пределах допуска, то печатаются «0», в противном случае печатается «1» в соответствующем разряде.

Опрос датчиков параметров режима сварки проводится по специальной команде программирующего устройства системы управления стыковой машиной. Количество измерений за цикл сварки устанавливается в зависимости от сложности программы изменения параметров режима. Так, при сварке рельсов Р65 на машине К190П с системой управления СУ-163 достаточно подробно можно наблюдать протекание сварочного процесса при измерении контролируемых параметров в моменты времени  $t_1$ — $t_6$  (рис. 5.54):

1-е измерение — по команде «пуск—сварка» ( $t_1$ ). В результате первого опроса датчиков выводятся на печать напряжение питающей

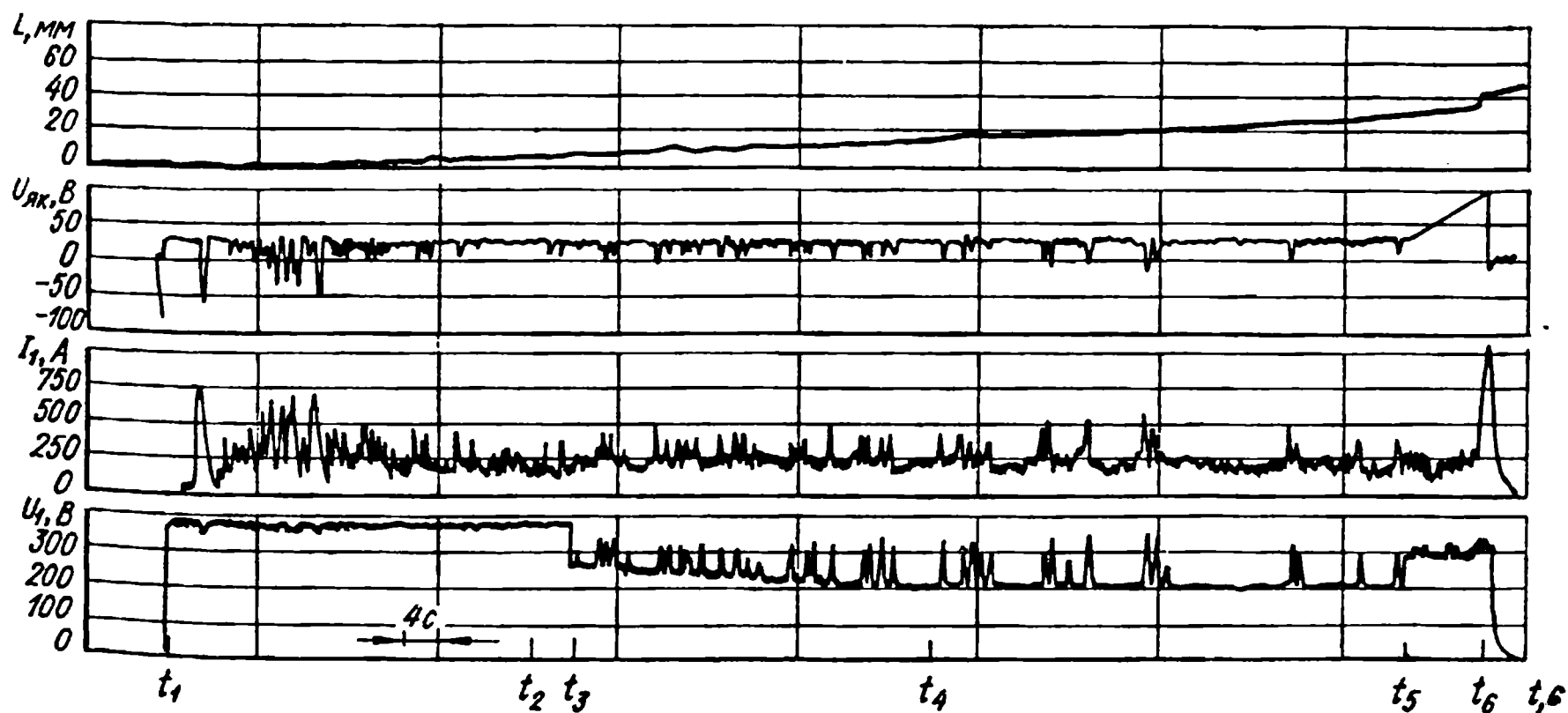


Рис. 5.54. Запись параметров режима сварки рельсов с системой управления СУ-163

сети  $U_1$ , ток холостого хода сварочного трансформатора  $I_1$ , начальная скорость перемещения подвижной плиты, пропорциональная напряжению на якоре  $U_{\text{як}}$  двигателя механизма перемещения, и ее исходное положение  $L$  (рис. 5.54);

2-е измерение — в конце этапа возбуждения устойчивого оплавления рельсов на высоком напряжении ( $t_2$ );

3-е измерение — при снижении напряжения на сварочном трансформаторе до 250 В ( $t_3$ );

4-е, 5-е измерения соответствуют началу ( $t_4$ ) и концу ( $t_5$ ) этапа оплавления при напряжении  $U_1 = 200$  В;

6-е измерение — в момент времени  $t_6$  непосредственно перед включением осадки. Результаты опроса датчиков позволяют оценить конечные значения перед осадкой сварочного напряжения, тока и скорости оплавления, а также припуске на оплавление;

7-е измерение — после завершения осадки, главным образом для контроля отклонения линейной величины осадки.

Применение систем автоматического контроля способствует своевременному обнаружению нарушений режима сварки и устранению причин, снижающих стабильность качества сварных соединений.

## 6. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ

### 6.1. Функции роботов и их состав

В производстве сварных конструкций 70-х годов все шире применяются функционально гибкие средства автоматизации сварочных операций — роботы.

Использование роботов позволяет решить три важнейшие проблемы современной технологии:

1) автоматизировать изготовление изделий при частой смене объектов производства, т. е. при серийном, крупносерийном и многономенклатурном массовом производстве;

2) автоматизировать операции, не поддающиеся рациональной автоматизации другими методами (сварку швов сложной формы; сварку изделий с большим количеством коротких швов, различным образом расположенных в пространстве);

3) применять для автоматизации изготовления различных сварных конструкций однотипные технические средства, в результате чего сокращается разнообразие последних, повышается серийность их изготовления, снижается стоимость при прочих равных условиях.

В сварке, как и в других видах производства, промышленные роботы применяются в составе робототехнологических комплексов (РТК). РТК для сварки представляет собой манипуляционную систему, оснащенную средствами осуществления сварочного процесса, с программным управлением координатами инструмента относительно изделия и параметрами процесса сварки.

Роботы в сварочном производстве впервые начали применяться в технологических процессах контактной точечной сварки с помощью сварочных клещей [25]. Для этих операций требуются роботы с позиционным управлением, грузоподъемностью до 600 Н, с повторяемостью отработки позиций не хуже  $\pm 1,5$  мм при маршевой скорости перемещений порядка 1 м/с. Цель позиционного управления — поочередное достижение сварочным инструментом заданных точек на изделии в определенной последовательности без управления траекторией движения между этими точками.

Роботы для дуговой сварки, создание и внедрение которых началось в конце 70-х годов, имеют контурное управление, при котором сварочный инструмент движется относительно изделия с заданной скоростью по заранее установленной траектории. Грузоподъемность таких роботов составляет 25—100 Н при повторяемости отработки траектории не хуже  $\pm 0,5$  мм и скорости сварки (в защитных газах) до 20 мм/с [49].

Физические особенности технологических процессов сварки влияют на требования, предъявляемые к техническим средствам роботизации сварочного производства. Так, дуговую сварку со свободным формированием шва целесообразно выполнять в нижнем положении.



РТК для этого случая должен содержать манипулятор изделия, ориентирующий свариваемую конструкцию периодически или непрерывно во время сварки так, чтобы швы находились во время сварки в нижнем положении.

Чтобы выполнить швы сложной формы неплавящимся электродом с присадочной проволокой, необходимо непрерывно ориентировать последнюю по касательной к линии соединения в точке сварки. Для этого применяют РТК с дополнительной подвижностью, обеспечивающей ориентацию присадочной проволоки в зоне сварки.

Специфическая особенность объектов сварочного производства — невысокая точность изготовления заготовок и их сборки под сварку, а также тепловые деформации свариваемой конструкции. Совместное действие этих факторов вызывает значительные отклонения линии сопряжения заготовок и геометрических параметров соединения, подготовленного под сварку, от расчетных (программных) [10]. В тех случаях, когда эти отклонения существенны, применяют методы и средства адаптации, заключающиеся в автоматической корректировке режима сварки и траектории движения сварочного инструмента индивидуально для каждого экземпляра изделия данного типоразмера (по результатам измерений каждого экземпляра, осуществляемых в процессе сварки или до ее начала).

Условия, в которых должны работать РТК для сварки, характеризуются: высокой температурой вблизи зоны сварки; мощными стационарными электромагнитными полями и световым излучением; разбрызгиванием расплавленного металла; интенсивным выделением аэрозолей, пыли, агрессивных газов. Поверхности изделия, положение которых измеряется для корректировки траектории и режима сварки, могут быть покрыты окалиной, иметь заусенцы, задиры и прилипшие брызги, а также протечи металла. Все это ограничивает выбор принципа действия и типов технических средств, требует специальных схемных и конструктивных мер для обеспечения надежной работы оборудования.

Экономическая особенность внедрения средств роботизации сварки состоит в том, что на операциях, намеченных к роботизации, дуговая сварка выполняется в большинстве случаев вручную или с применением шланговых полуавтоматов, представляющих собой механизированный ручной инструмент, а контактная точечная сварка — на стационарных одноэлектродных сварочных машинах или с применением сварочных клещей. Стоимость такого сварочного оборудования сравнительно невелика. Стоимость же РТК для сварки в десятки, а иногда в сотни раз превышает стоимость заменяемого ручного или механизированного сварочного инструмента либо сварочных машин. Это обуславливает большой относительный рост капиталовложений при переходе к роботизации сварки. Поэтому, чтобы получить положительный экономический эффект, необходимо принимать более простые и недорогие технические решения при создании РТК для сварочных операций.

В состав манипуляционной системы РТК для сварки входят манипулятор сварочного инструмента и манипулятор изделия или только один из них. Состав манипуляционной системы, количество степеней

по подвижности манипулятора сварочного инструмента и манипулятора изделия зависят от способа осуществления относительного перемещения сварочного инструмента и изделия. Способ определяется видом сварки, размерами и массой изделий, формой и расположением сварных швов, организацией сварочных операций и всего производственного процесса.

В качестве сварочного оборудования роботов иногда используют серийную сварочную аппаратуру (шланговые полуавтоматы, сварочные клещи для точечной сварки и т. д.) и источники питания. Однако для этой цели разрабатывают специальное («машинное») сварочное оборудование для роботов, основные особенности которого следующие: возможность программного управления параметрами процесса сварки; возможность более длительной работы без технического обслуживания. Последнее достигается повышением долговечности быстро изнашивающихся элементов, автоматизированной очисткой сварочного инструмента от брызг расплавленного металла, увеличением емкости контейнеров со сварочными материалами и т. д.

Программное управление параметрами режима сварки может осуществляться либо автоматическим переключением на один из нескольких режимов, выбранных с помощью переключателей или потенциометров на пульте управления сварочным оборудованием, либо в виде так называемого свободного программирования, позволяющего задать режим в цифровой форме практически без ограничений по количеству режимов и плавности перехода от одного значения параметра к другому.

Важными частями комплекса сварочного оборудования для роботов являются также устройства, предотвращающие повреждение сварочного инструмента при случайном соприкосновении его с элементами изделия, сборочно-сварочного приспособления и другими частями РТК.

Основные тенденции при разработке РТК — модульное исполнение технических средств и программного обеспечения, а также применение методов агрегатирования при решении конкретных задач.

## **6.2. Манипуляторы роботов**

В сварке используют следующие основные способы организации сварочных операций:

1. Изделие не меняет своей ориентации в пространстве в течение всей операции, а сварочный инструмент выполняет все перемещения, необходимые для сварки. Этот способ можно использовать, когда все швы доступны для манипулятора (манипуляторов) инструмента или когда переориентация изделия затруднена. Такой вариант широко применяют при роботизации контактной точечной сварки, при которой ориентация зоны сварки относительно направления силы тяжести не влияет на режим сварки и качество сварного соединения.

2. Изделие периодически меняет свою ориентацию в пространстве с помощью манипулятора изделия, выполненного в виде кантователя или позиционера, но во время отдельных сварочных переходов остается неподвижным, а сварочный инструмент выполняет все перемеще-

ния, необходимые для сварки, с учетом смещений изделия при его переориентации. Этот способ используют, если необходима и достаточно периодическая переориентация изделия. В настоящее время он наиболее распространен при роботизации операций дуговой сварки.

3. Изделие и сварочный инструмент непрерывно находятся в движении, обеспечивая перемещение сварочного инструмента вдоль линии соединения с одновременным поддержанием зоны сварки во всех точках шва, в заданном, например нижнем, положении. Этот способ требует контурного взаимно согласованного управления подвижностями манипулятора инструмента и манипулятора изделия, т. е. наиболее сложной системы управления; однако он является оптимальным для дуговой сварки изделий малых и средних габаритов со швами сложной формы, так как позволяет производить сварку всех участков в положении, обеспечивающем наилучшие условия формирования сварного шва.

4. Изделие выполняет все перемещения, необходимые для сварки, а сварочный инструмент закреплен неподвижно. В общем случае этот способ требует применения манипулятора изделия с пятью степенями подвижности, т. е. использования в этом качестве промышленного робота. Применение данного способа ограничивается грузоподъемностью современных роботов (с соответствующей системой управления) до 500—800 Н. Этот способ применяют, например, при контактной точечной сварке небольших листовых конструкций на стационарной точечной машине или при дуговой сварке относительно легких изделий с помощью стационарного аппарата для дуговой сварки либо стационарно установленной сварочной горелки. Преимущество данного варианта — один и тот же промышленный робот используют для выполнения транспортной и сварочной операций.

Роботы для сварки строят в различных системах координат переносных движений: *прямоугольной, цилиндрической, двухполярной цилиндрической, сферической и двухполярной сферической* (называемой также антропоморфной), *рычажной, ангулярной*. На рис. 6.1 и далее для обозначения поступательных перемещений, осуществляемых вдоль координатных осей, использованы символы  $X, Y, Z$ ; для вращательных перемещений вокруг осей, параллельных  $X, Y, Z$ , — символы  $A, B, C$  соответственно, а для вращательных движений вокруг произвольно расположенных или меняющих свою ориентацию относительно  $X, Y, Z$  осей — символы  $D, E$ . Наибольшее распространение для дуговой сварки получили роботы с антропоморфной (рис. 6.1, *е*) и прямоугольной (рис. 6.1, *а, б*) системами координат переносных движений. Для контактной точечной сварки чаще других применяются роботы со сферической (рис. 6.1, *д*), антропоморфной (рис. 6.1, *е*) системами координат переносных движений.

*Манипуляторы сварочного инструмента с прямоугольной системой координат* при модульной конструкции могут быть реализованы в наибольшем количестве вариантов. Направления переносных движений манипуляторов параллельны линиям швов или плоскостям, в которых расположены швы большинства сварных конструкций, что упрощает процедуру обучения, систему управления и средства адаптации. Они

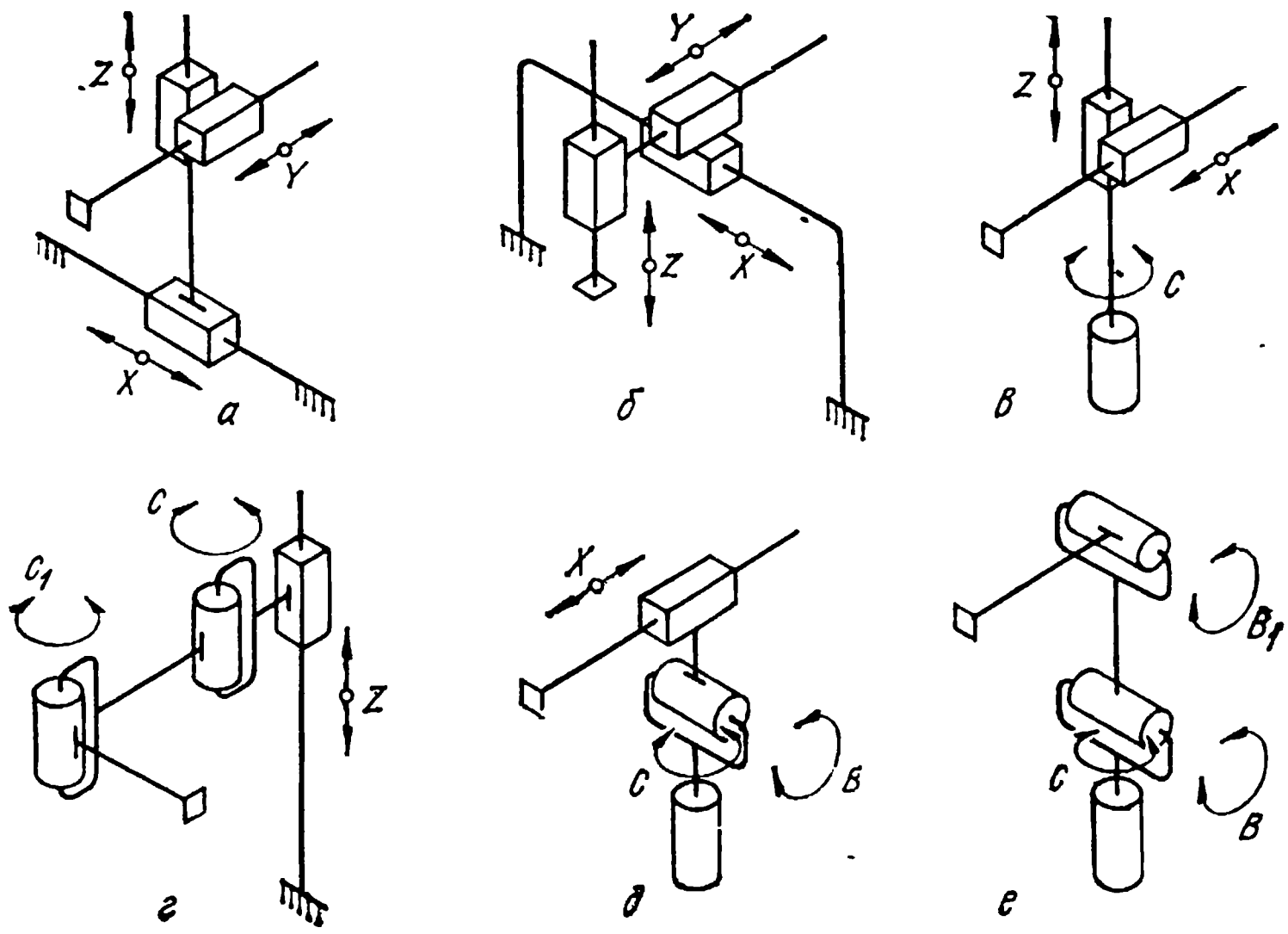


Рис. 6.1. Структурные схемы основных типов манипуляторов сварочного инструмента с прямоугольной (а, б), цилиндрической (в), двухполярной цилиндрической (г), сферической (д) и двухполярной сферической (антропоморфной) (е) системами координат переносных движений

позволяют обслуживать большие рабочие зоны, что особенно важно при сварке одним роботом изделий больших габаритов. Недостатки манипуляторов с прямоугольной системой координат: значительная металлоемкость и большое занимаемое пространство; необходимость в механизмах, преобразующих вращательное движение в поступательное, и устройствах для защиты прямолинейных направляющих и указанных передач.

Манипуляторы с антропоморфной системой координат имеют небольшую металлоемкость, малые собственные габаритные размеры, простые и компактные механизмы привода. В этих манипуляторах не нужны механизмы и направляющие прямолинейного перемещения, а следовательно, и защита их от внешних воздействий. Недостатки манипуляторов сварочного инструмента с антропоморфной системой координат: невозможность обслуживания больших рабочих пространств; неизбежное повышение требований к точности передач при увеличении размеров рабочего пространства. С совершенствованием методов и технических средств управления координатами звеньев манипуляционных систем РТК для сварки такие преимущества прямоугольной системы координат, как параллельность осей координат линиям швов и связанные с этим упрощения процедуры обучения, системы управления и средств адаптации, теряют свое решающее значение. Современные системы управления манипуляторами с антропоморфной (и любой другой) структурой позволяют оператору при обучении осуществлять прямолинейные перемещения рабочего органа вдоль координатных осей в привычной для человека декартовой системе за счет автоматического согласования работы приводов всех звеньев антропоморфного манипулятора. Поэтому преимущества манипуляторов

с антропоморфной системой координат приобретают решающее значение. Например, небольшие собственные габаритные размеры антропоморфных манипуляторов делают их особенно удобными при сварке небольших изделий или отдельных швов (участков швов) изделий средних и больших габаритов. В последнем случае одно изделие может одновременно свариваться несколькими роботами, что позволяет осуществлять роботизацию так называемой многоголовочной сварки.

РТК с прямоугольной структурой остаются предпочтительными при сварке изделий средних и крупных габаритов, когда нецелесообразно производить их одновременную сварку несколькими роботами. В этом случае большие собственные габариты робота соизмеримы с габаритами изделия. Известны также манипуляторы сварочного инструмента, в которых сочетаются прямолинейные перемещения с перемещениями, осуществляемыми антропоморфными устройствами. Такие решения позволяют получить большие обслуживаемые пространства при использовании только одного механизма прямолинейного перемещения.

Манипуляторы сварочного инструмента с прямоугольной системой координат могут иметь различную компоновку (рис. 6.2). Основное достоинство компоновки порталного типа (рис. 6.2,а) — расположение всех направляющих выше уровня сварки, что обеспечивает их надежную защиту от механических повреждений и забрызгивания. Кроме того, при данной компоновке остается свободной нижняя часть пространства между опорами манипулятора сварочного инструмента, где могут быть расположены технические средства подачи заготовок на сварку и отвода изделия после сварки. Такая компоновка наиболее часто встречается в обычных установках для дуговой сварки. Недостатки компоновки (рис. 6.2,а): повышенная металлоемкость; необходимость площадки для обслуживания высоко расположенных механизмов; усложнение механизма уравнивания вертикально перемещающихся частей.

Для манипуляторов горелки с небольшим размером рабочего пространства могут применяться компоновки с напольным (нижним) расположением модуля перемещения по первой от основания координате (рис. 6.2,б).

При сварке изделий на конвейере можно рекомендовать компоновку туннельного типа (рис. 6.2,в), предусматривающую сварку одного изделия с трех сторон одновременно тремя сварочными инструментами. Эта компоновка достаточно жесткая, но доступ к изделию при обучении и для отладки процесса сварки затруднен.

При дуговой сварке изделий больших габаритов, например в судостроении, целесообразно использовать компоновку манипулятора горелки (на рис. 6.2, г). Перемещение тяжелого портала может быть лишь установочным (с позиционным управлением), а сварка отдельных участков изделия выполняется при неподвижном портале при перемещении по трем координатам с помощью механизмов переносных движений собственно манипулятора горелки. При больших размерах портала целесообразно использовать на одном портале одновременно несколько манипуляторов горелки.

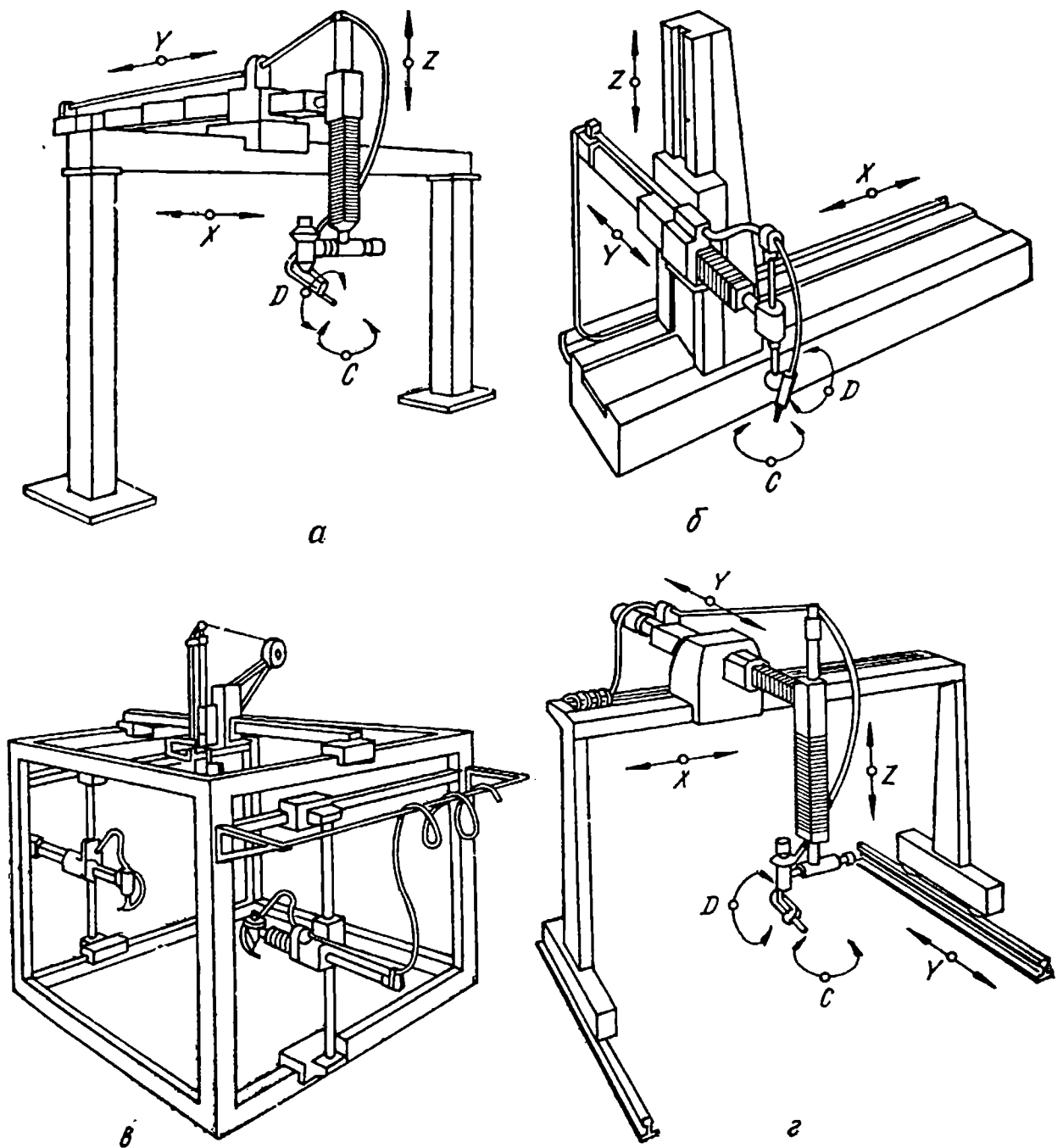


Рис. 6.2. Компоночные схемы манипуляторов сварочного инструмента с прямоугольной системой координат переносных движений:  
*а* — порталная с неподвижным порталом; *б* — напольная; *в* — туннельная; *г* — порталная с подвижным порталом

Манипуляторы сварочного инструмента с антропоморфной системой координат (рис. 6.3) можно устанавливать на полу в нижнем положении или на металлоконструкциях в потолочном положении (рис. 6.3, б). Для получения зоны обслуживания, вытянутой вдоль прямой, антропоморфный манипулятор устанавливают на модуль прямолинейного перемещения, расположенный на полу или на портале.

Ориентирующими движениями манипулятора инструмента являются одно—три вращательных движения, осуществляемых вокруг непараллельных осей (рис. 6.4). Иногда в блок механизмов ориентирующих перемещений встраивают механизм поступательного движения (рис. 6.4, а), который обеспечивает сварку прямолинейных и круговых угловых швов на плоскости при относительно простой системе управления (числовой позиционной или даже цикловой). Если оси всех ориентирующих вращений проходят через точку сварки (рис.



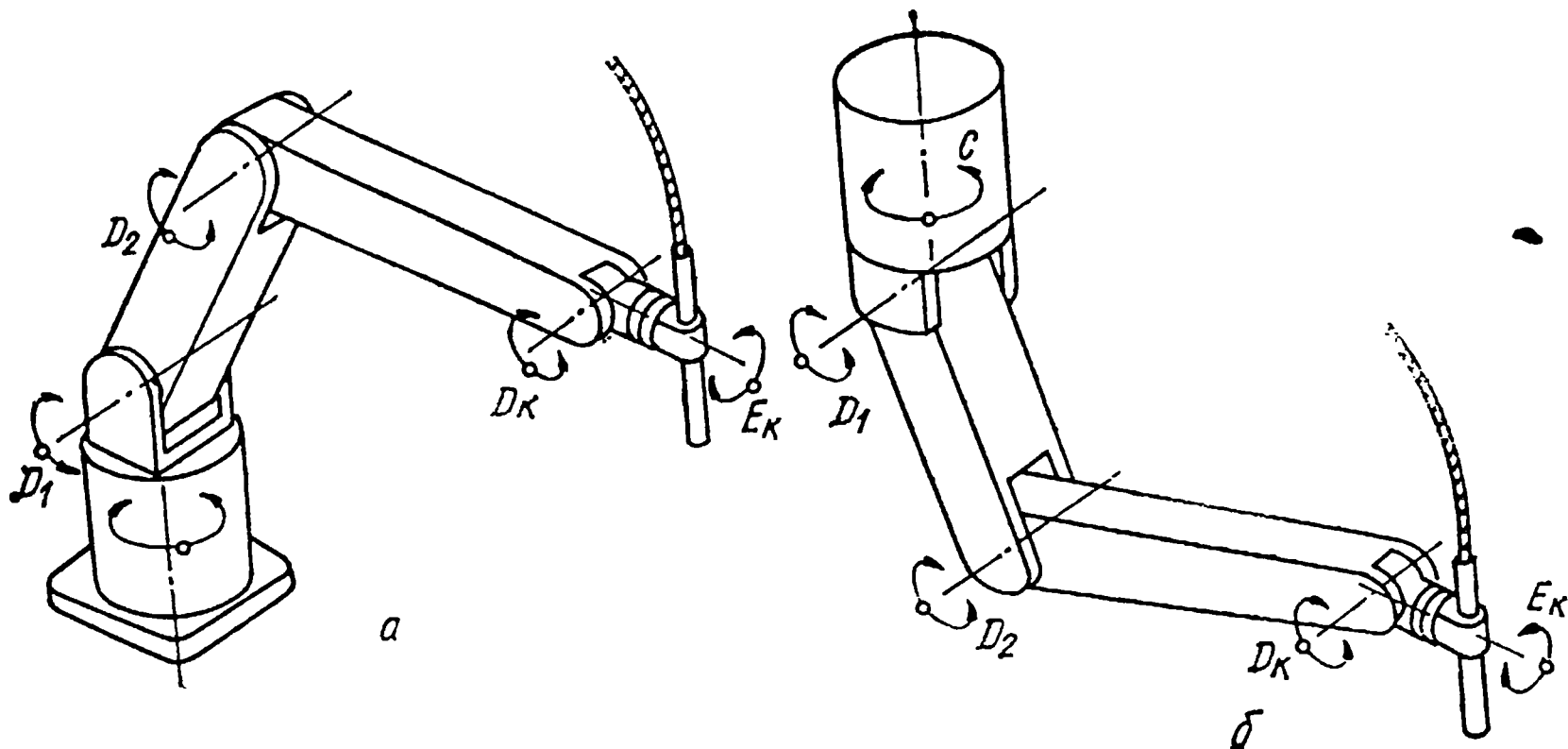


Рис. 6.3. Компонентные схемы манипуляторов сварочного инструмента с двухполюсной сферической системой координат переносных движений:  
*а* — напольная; *б* — потолочная

6.4, *г*), то переносные координаты не зависят от ориентирующих. В результате упрощается задача автоматического управления манипуляционной системой; снижаются требования к точности отработки ориентирующих движений; уменьшаются наибольшие рабочие скорости переносных движений; упрощается система управления и процедура обучения робота.

При сварке неплавящимся электродом с присадкой, а также при использовании многих типов датчиков текущей адаптации требуются трехкоординатные механизмы ориентирующих движений для поворота горелки вокруг ее оси. Сочетание трех вращений вокруг непараллельных осей (рис. 6.4, *д*) обеспечивает необходимую ориентацию горелки также и относительно ее оси.

Блочный принцип позволяет для каждого рабочего места в зависимости от конкретной технологической задачи применять оптимальную по структуре и сложности специализированную манипуля-

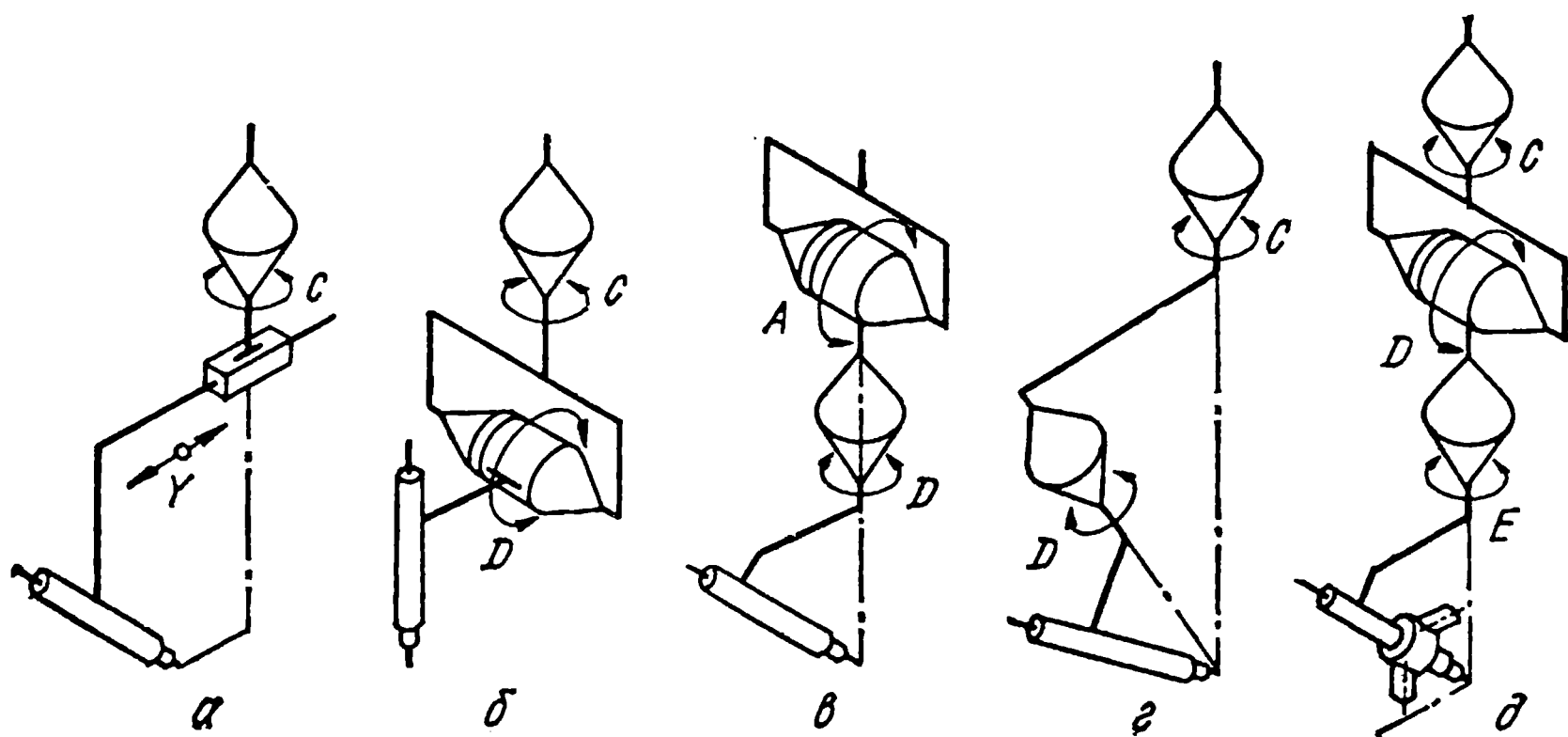


Рис. 6.4. Структурные схемы основных типов механизмов ориентирующих движений манипуляторов сварочного инструмента с двумя (*а б, в, г*) и тремя (*д*) ориентирующими подвижностями

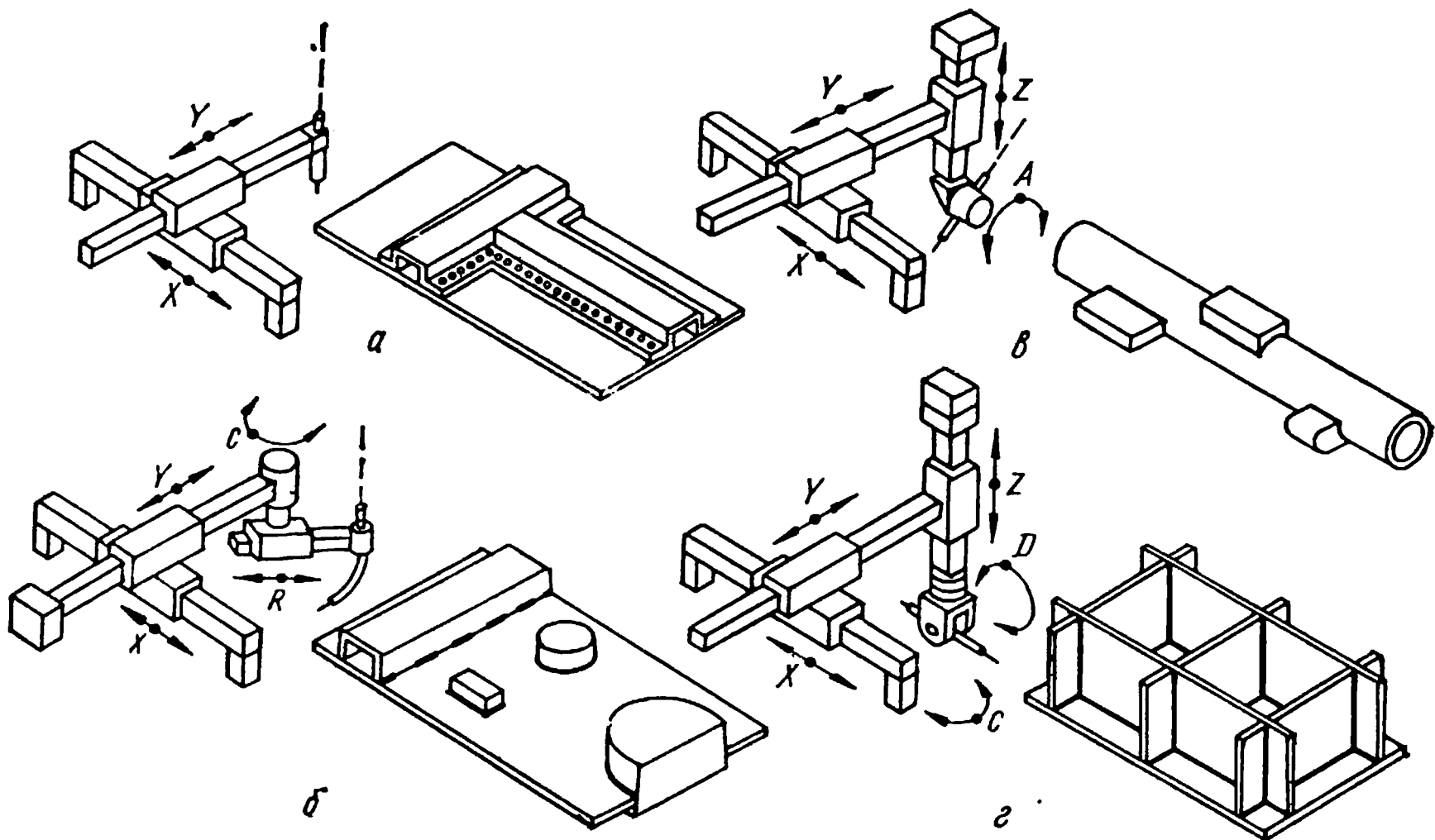


Рис. 6.5. Компонентные схемы специализированных манипуляторов сварочного инструмента и фрагменты типовых изделий при цикловом управлении координатами

ционную систему (рис. 6.5) и, следовательно, оптимальный тип привода и наиболее подходящую по структуре и функциональным возможностям систему управления, т. е. создавать роботизированные рабочие места с определенным уровнем специализации. Специализированные роботы блочно-модульной конструкции применяют в крупносерийном и массовом производствах прежде всего для сварки изделий, требующих перемещения сварочного инструмента с одной—четырьмя степенями подвижности. Функционально неделимые универсальные сварочные роботы с пятью и более степенями подвижности и позиционной или контурной системой управления преимущественно используют при частой смене объектов производства (мелкосерийного и серийного, а также многономенклатурного крупносерийного) для сварных изделий со швами сложной формы.

Манипуляторы изделия — менее универсальные элементы РТК для сварки, чем манипуляторы сварочного инструмента. Их кинематическая структура и компоновка существенно зависят от формы и размеров изделия, а также от формы и расположения линий соединения свариваемых элементов. Манипуляторы изделия чаще всего выполняют в виде одно- или двухкоординатных кантователей (позиционеров) с периодическим изменением положения изделия либо одно- или двухкоординатах вращателей с непрерывным изменением координат изделия для поддержания зоны сварки в нижнем положении при выполнении швов на поверхностях сложной формы. Манипулятор изделия может вообще отсутствовать, например, при сварке на конвейере. На рис. 6.6,а изображена схема манипуляционной системы с одним однокоординатным, а на рис. 6.6,б с двухкоординатным манипулятором изделия. При необходимости можно использовать дополнительную опору второго конца изделия (показана штриховой линией на рис. 6.6,б).

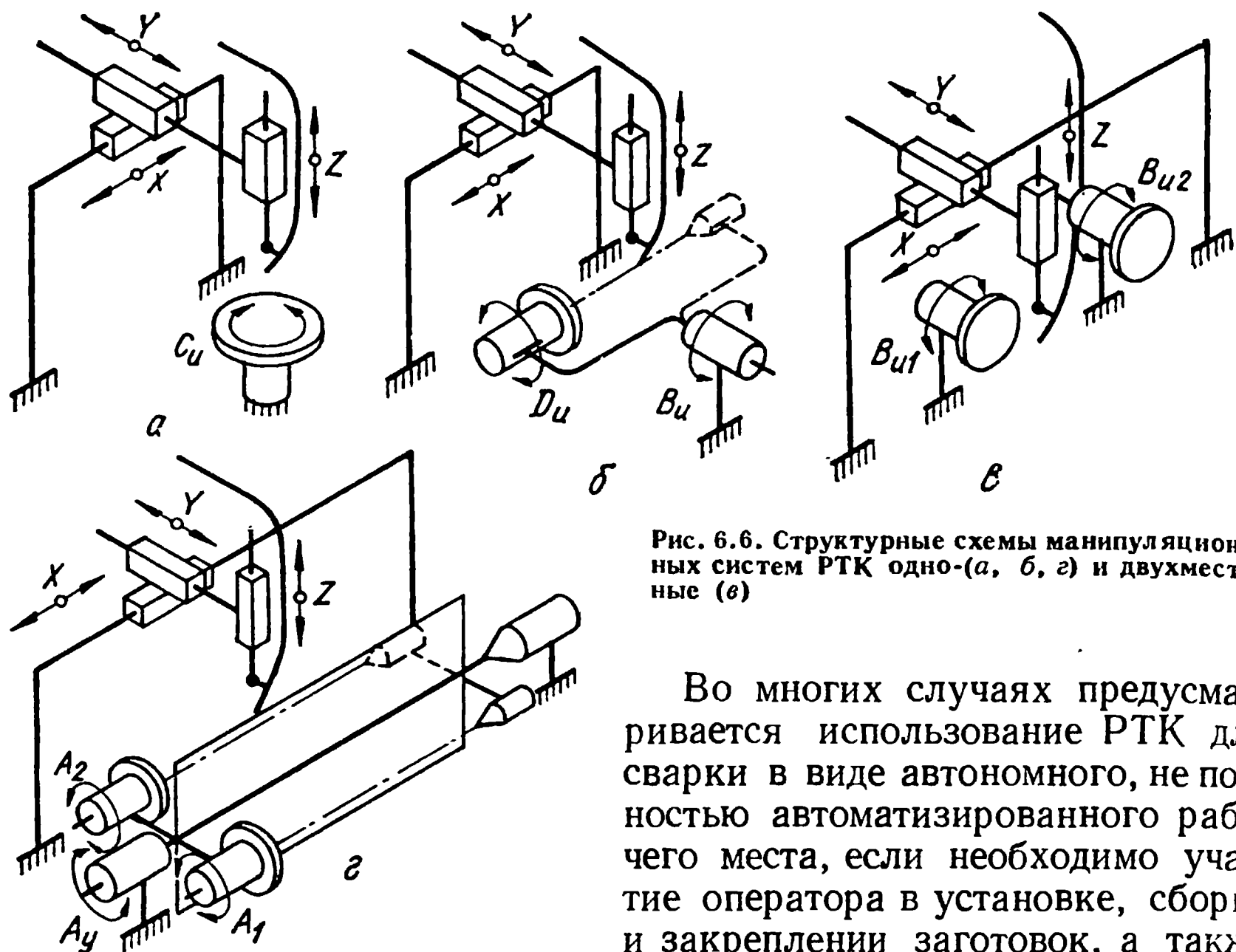


Рис. 6.6. Структурные схемы манипуляционных систем РТК одно-(а, б, в) и двухместные (г)

Во многих случаях предусматривается использование РТК для сварки в виде автономного, не полностью автоматизированного рабочего места, если необходимо участие оператора в установке, сборке и закреплении заготовок, а также в снятии изделия. В этих случаях целесообразно применять двухместные РТК (рис. 6.6, в) и РТК с двух- или многопозиционным столом либо барабаном (рис. 6.6, г). На рис. 6.6 во всех компоновках изображена схема манипулятора сварочной горелки, соответствующая рис. 6.1, б, однако манипулятор горелки может иметь другую структуру (см. рис. 6.1, а—е). В двухместном РТК в то время, пока на одном из манипуляторов ведется сварка, на втором выполняются загрузочно-разгрузочные, сборочные, прихваточные и другие вспомогательные работы. В РТК с двухпозиционным поворотным столом или барабаном обеспечивается совмещение времени сварки на одной позиции со временем сборочных, прихваточных и других вспомогательных работ на второй позиции. В каждой позиции может быть предусмотрено закрепление изделий неподвижно или на одно- либо двухкоординатном манипуляторе изделия.

Преимущество двухместных компоновок — применение двух отдельных, не связанных между собой, манипуляторов изделия. Однако при этом рабочий вынужден попеременно перемещаться от одного рабочего места к другому. Кроме того, необходимо исключить возможность перемещения сварочного инструмента в зону действия рабочего. Двухместные компоновки целесообразно применять при сварке тяжелых изделий средних и крупных габаритов.

Преимущество компоновок РТК с двухпозиционным столом или барабаном — постоянное место для рабочего и разделение в пространстве рабочей зоны манипулятора сварочного инструмента и зоны действия рабочего. Однако в комплексе появляется дополнительный механизм для поворота стола или барабана в ту или иную позицию. Компоновки РТК с двухпозиционным столом наиболее целесообразны

ны для легких изделий, преимущественно небольших габаритов. Поворотные барабаны можно применять для сварки длинных изделий типа балок.

Важнейшим элементом манипуляторов сварочного инструмента и изделия являются приводы перемещения звеньев манипуляционной системы, так как они определяют точность обработки программы движений и в значительной степени производительность РТК. В современных РТК скорость перемещения рабочих органов может изменяться от 0,5—1,5 м/с при маршевых перемещениях сварочного инструмента относительно изделия (подвод и отвод инструмента, холостые перемещения инструмента между отдельными швами или точками) до долей миллиметра в секунду (по отдельным координатам) — при дуговой сварке. Поэтому приводы современных РТК для сварки имеют диапазон регулирования до  $10^4$  (в лучших моделях до  $2 \cdot 10^4$ ), и их параметры обеспечивают высокую статическую и динамическую точность. Для этого полоса пропускания частот у современных приводов роботов должна быть не менее 50 Гц (в лучших образцах она достигает 120 Гц и более).

Наиболее распространенные типы приводов — *тиристорные*, или *транзисторные*, *электроприводы* с высокомоментным двигателем постоянного тока.

Кроме приводов на основе высокомоментных двигателей в звеньях манипуляционных систем роботов для дуговой сварки могут быть эффективно использованы *приводы с вентильными двигателями* (бесколлекторные) и с *асинхронными двигателями*. В асинхронном глубокорегулируемом приводе с частотно-токовым управлением применяют простые, недорогие и очень надежные в эксплуатации трехфазные асинхронные двигатели переменного тока. Однако преобразователь этого привода более сложный и дорогой, чем у привода на основе высокомоментных двигателей постоянного тока. Тем не менее асинхронный регулируемый привод с частотно-токовым регулированием является перспективным.

Современный электропривод, который можно использовать в качестве привода звеньев манипуляционной системы робота для дуговой сварки, должен иметь наименьшие габариты. Это относится к электро-механической части и к полупроводниковому преобразователю. Малые габариты двигателей достигаются применением высокоэнергетических постоянных магнитов и высококачественных изоляционных материалов, совершенствованием охлаждения. Чтобы исключить тахогенератор из состава привода, сигнал, пропорциональный частоте вращения, получают от датчика положения ротора двигателя или приводимого звена манипуляционной системы. Габариты тиристорных и транзисторных преобразователей уменьшают, применяя элементы с высокой степенью интеграции и используя малогабаритные силовые полупроводниковые приборы.

Современные преобразователи приводов небольшой мощности выполняют на одной печатной плате [20].

В манипуляционных системах сварочных роботов применяют также *дискретный (шаговый) привод*, который может быть двух типов: а) с силовым шаговым двигателем; б) с управляющим шаговым двига-

телем и усилителем крутящего момента или тягового усилия (чаще всего гидравлическим). Преимущества шагового привода — простота, небольшая стоимость и достаточно высокая надежность, а основной недостаток — невозможная потеря информации при сбое.

В манипуляционных системах сварочных РТК применяют также *гидравлические приводы*. Они позволяют относительно просто получить большой диапазон регулирования, а их динамические характеристики наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к приводам манипуляционных систем роботов. Однако гидравлический привод имеет эксплуатационные недостатки: нагрев масла и необходимость в охлаждающих устройствах; сложность подвода и отвода масла к последним звеньям многозвенных манипуляторов; утечки масла, особенно с учетом того, что попадание масла в зону сварки приводит к образованию дефектов сварного шва. Гидравлический привод применяют в роботах с большой грузоподъемностью, например, для контактной точечной сварки клещами, а также для манипуляторов с обратимой кинематикой, которая используется при непосредственном обучении робота перемещением его рабочего органа рукой оператора.

*Пневматический привод* применяют в манипуляторах сварочных РТК только для привода звеньев, выполняющих периодическое позиционирование в ограниченное число позиций, чаще всего в две. Управление положением осуществляется с применением путевых переключателей и жестких упоров.

### **6.3. Основные принципы управления роботами для сварки**

«Идеальный» робототехнический комплекс для сварки (рис. 6.7) «оценивает» предъявляемое ему изделие, используя для этого измерительные устройства сенсорной подсистемы, выбирает рациональный порядок сварки швов, а также рассчитывает траекторию перемещений сварочного инструмента относительно изделия и оптимальные значения параметров процесса сварки. Информацию, необходимую для автоматической выработки программы сварки любого изделия определенного класса, можно получить с помощью сенсорной подсистемы РТК. Измерительные устройства сенсорной подсистемы перемещаются относительно изделия с помощью манипулятора сварочного инструмента или отдельного манипулятора. Однако часть измерительных устройств сенсорной подсистемы может быть неподвижной.

В настоящее время практически реализовать «идеальную» модель самообучающего РТК для сварки трудно. Поэтому в современных РТК предусматривается подробное программирование (обучение) робота для каждого типоразмера изделия, которое сваривается на данном РТК. Выбор необходимой программы из числа заранее введенных в память РТК производится оператором либо по команде от системы управления верхнего уровня, либо автоматически по предъявлению роботу очередной детали, которую он распознает по простым, но характерным признакам формы и размеров или по маркировке, специально нанесенной на деталях. Для роботов применяют следующие виды программирования перемещения:









приводом); элементарных программных операций; элементарных операций в функции от информации о внешней среде; отдельных законченных технологических операций; искусственного интеллекта.

Создание РТК для дуговой сварки (РТК ДС) с искусственным интеллектом рассматривается в настоящее время только в плане перспективы дальнейшего развития исследований.

На уровне искусственного интеллекта должны решаться задачи выбора стратегии обработки сварной конструкции, включающей выбор оптимального плана перемещения сварочного инструмента и (или) изделия, а также выбор оптимальных технологических режимов сварки. Входная информация на этом уровне поступает от оператора или системы управления более высокого уровня (например, системы автоматического проектирования изделия — САПР) и от датчиков состояния окружающей РТК ДС операционной среды. Результатом обработки этой информации является программа обработки изделия (ПОИ), записанная на проблемно-ориентированном языке. При отсутствии в системе управления уровня искусственного интеллекта эта задача решается технологом-сварщиком, программирующим технологический процесс.

Программа обработки изделия — исходная информация для следующего уровня управления, на котором производится ее интерпретация, т. е. преобразование в последовательность команд, обеспечивающих выполнение заданного технологического процесса.

Третий уровень иерархии управления обеспечивает адаптацию работа к реальным условиям сварки. Здесь производится корректировка аргументов (т. е. координат горелки и значений параметров режима сварки) и команд в соответствии с полученной от сенсоров информацией о фактических геометрических и технологических условиях сварки. Второй уровень осуществляет интерполяцию заданных участков траектории в пространстве координат рабочей зоны комплекса и преобразование координат узлов интерполяции в криволинейную систему координат звеньев манипуляционной системы РТК.

Назначение самого нижнего уровня иерархии — управление сервоприводом и обеспечение движения горелки относительно изделия с заданными скоростью и точностью вдоль заданной траектории.

Иерархическая структура управления РТК ДС может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 6.9). Для того чтобы эта схема могла служить исходным материалом для синтеза системы управле-

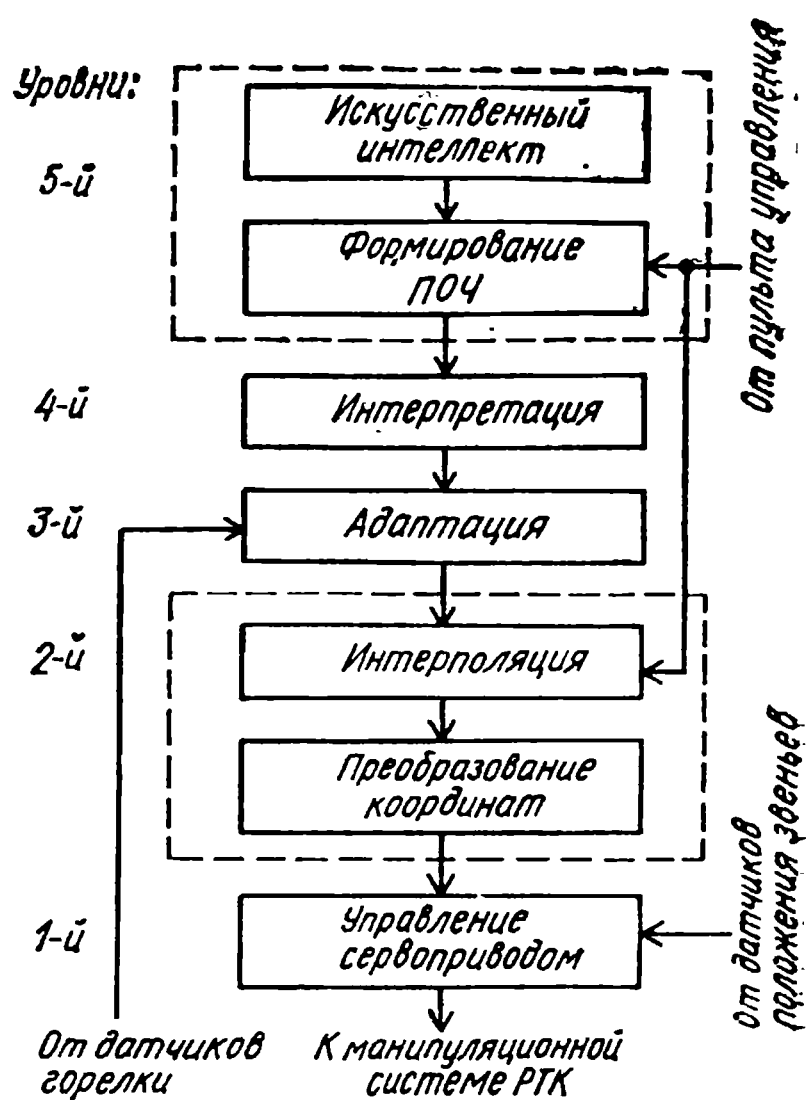


Рис. 6.9. Иерархическая структура управления РТК

ния комплексом, в ней необходимо отразить способы подключения системы сбора информации о состоянии комплекса и его операционной среды, а также способы восприятия команд оператора. Обратной связью от датчиков положения звеньев манипулятора должен быть охвачен нижний уровень управления. Команды оператора должны восприниматься на входе четвертого (операторы языка программы обработки изделия) и второго уровней (команды «ручного» управления комплексом, которые могут потребоваться при формировании ПОИ методом «обучения»). Кроме того, необходима внутренняя обратная связь в системе (обратный информационный поток), позволяющая верхним уровнем при необходимости в любой момент получить информацию о текущем состоянии элементов комплекса (текущем положении рабочего органа).

#### **6.4. Методы и технические средства адаптации роботов для сварки**

Возможность широкой роботизации сварочного производства в значительной степени зависит от наличия простых и надежных методов и средств адаптации, пригодных для использования в составе РТК для сварки [18].

Случайные отклонения линии сопряжения свариваемых элементов от расчетного положения вызывают необходимость геометрической (пространственной) адаптации, при которой корректируется траектория перемещения сварочного инструмента относительно изделия. Случайные отклонения геометрических характеристик соединения, подготовленного под сварку (зазор, сечение разделки, взаимное положение кромок свариваемых элементов и т. д.), вызывают технологическую адаптацию, при которой корректируются параметры процесса сварки (сварочный ток, напряжение дуги, скорость сварки, амплитуда и частота колебаний электрода и т. п.).

Большинство реальных задач требует геометрической адаптации намного чаще, чем технологической. Поскольку заготовки располагаются в рабочей зоне РТК для сварки не произвольно, а таким образом, что отклонения линии соединения от заданного положения меньше размеров изделия на два-три порядка, геометрическая адаптация производится путем малых корректировочных смещений сварочного инструмента относительно изделия. При этом различают два класса задач геометрической адаптации: первый — отклонение линии соединения свариваемых элементов от заданного положения не сопровождается искажением формы этой линии; второй — отклонение линии соединения от расчетного положения сопровождается случайными изменениями ее формы.

Для первого класса задач случайные отклонения линии соединения могут быть сведены к ее параллельному переносу или повороту в рабочем пространстве. Принцип адаптации, используемый для решения рассматриваемого класса задач, основан на том, что при неизменной форме линии соединения для получения информации о необходимой корректировке программы перемещений для данного экземпляра изделия достаточно определить до начала сварки с помощью датчика

поиска положение определенного числа базовых точек на тех поверхностях свариваемых элементов, пересечения которых образуют линию соединения или отстоят от нее на неизменном расстоянии. Датчик поиска можно рассматривать как, например, тактильный прибор с шаровым (дисковым) щупом радиуса  $r$  или бесконтактный датчик расстояния до поверхности изделия. Чтобы определить положение базовой точки, датчику поиска сообщается поисковое движение по направлению к поверхности изделия, на которой выбрана базовая точка. Последняя определяется как точка пересечения линии поиска с поверхностью изделия. Ориентация линий поиска в рабочей зоне остается неизменной для всех экземпляров изделия данного типоразмера.

Для определения положения тела в пространстве в общем случае необходимо найти положения трех непараллельных между собой плоскостей, принадлежащих этому телу. Каждая плоскость определяется положением трех базовых точек, не лежащих на одной прямой. Таким образом, при решении задач геометрической адаптации необходимо найти положения девяти базовых точек.

В универсальном РТК поиск всех базовых точек должен производиться последовательно до начала сварки, что требует значительных затрат времени. Поэтому для конкретных типовых задач необходимо уменьшить количество базовых точек. Например, при малых смещениях жесткого элемента в пространстве для определения нового положения всех его точек находят фактическое положение шести базовых точек, а при приварке случайно смещенного жесткого элемента любой формы к плоскому листу, не изменяющему своего положения в пространстве, — смещения трех базовых точек (см. прил. 22).

Неизменность формы линии соединения при ее случайных смещениях характерна для сварки коротких швов на конструкциях средних и больших габаритов, например, на конструкциях каркасно-решетчатого типа. Случайные смещения коротких отрезков линии соединения могут быть сведены к случайному параллельному переносу, так как не учитываемый поворот короткой линии соединения дает погрешности, которыми для большинства случаев производства сварных конструкций можно пренебречь. При пространственном (трехмерном) параллельном переносе необходимо в общем случае определять положения трех базовых точек, а при плоском (двухмерном) — только двух. Если учитывать только параллельный перенос, то процедура адаптации существенно упрощается: смещается программа по двум или трем декартовым координатам. Методика определения величины координатных коррекций сварочного инструмента РТК относительно линии соединения свариваемых элементов рассмотрена в прил. 22.

Положение базовых точек и сварку можно определить как одной и той же, так и различными манипуляционными системами. В последнем случае одна измерительная манипуляционная система может выдавать данные для корректировки программы нескольким технологическим манипуляционным системам.

Второй, более общий класс задач характеризуется не только случайным смещением линии соединения в пространстве, но и случайным искажением ее формы. Чтобы решать эти задачи, необходимо опреде-

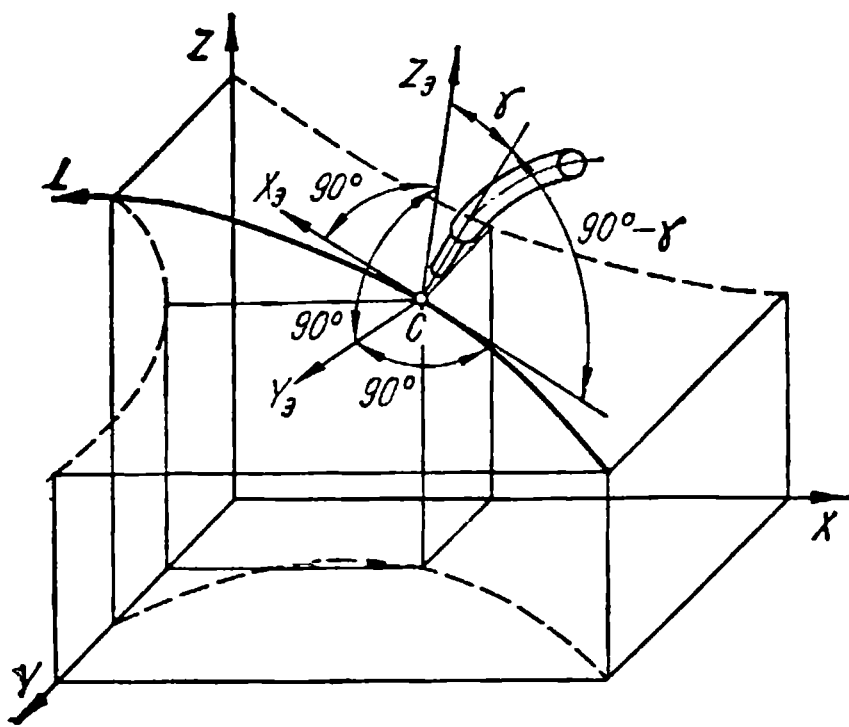


Рис. 6.10. Направление измерения  $x_3$ ,  $y_3$ ,  $z_3$  случайных отклонений линии соединения от расчетного (программного) положения

чество сварного соединения — незначительно. Поэтому при сварке швов с большим радиусом кривизны достаточно определять три линейные составляющие  $\Delta X_3$ ,  $\Delta Y_3$ ,  $\Delta Z_3$  смещения линии соединения  $L$  (рис. 6.10) относительно программного положения и корректировать на соответствующую величину текущее положение горелки (точки сварки) относительно изделия, не меняя ее ориентации.

Составляющая  $\Delta X_3$  в рассматриваемом случае необходима только при сварке незамкнутых швов — для определения момента включения и отключения сварки. На остальном протяжении шва составляющая  $\Delta X_3$  может не использоваться, так как она практически не влияет (при сварке швов с большим радиусом кривизны) на отклонение линии сопряжения от программного положения оси горелки.

Таким образом, текущая адаптация при сварке швов с большим радиусом кривизны предполагает определение двух составляющих отклонения линии соединения от расчетного положения:  $\Delta Y_3$  и  $\Delta Z_3$  и соответствующей им коррекции положения горелки без изменения ее программной ориентации. Чтобы измерить величину и знак указанных составляющих, можно использовать два относительно простых однокоординатных датчика или один двухкоординатный, подобные тем, которые применяются в системах коррекции положения горелки при сварке прямолинейных и круговых швов. Текущая ориентация датчиков должна осуществляться по программе. Для этого необходима дополнительная управляемая подвижность манипулятора горелки (см. рис. 6.4).

Для частных задач дополнительную подвижность не используют. Например, при сварке широко распространенных угловых швов в положении «в угол» для изменения ориентации датчиков можно использовать вращение горелки вокруг вертикальной оси, имеющейся на многих моделях роботов с прямоугольной системой координат переносных движений. Отклонения изменяются датчиками во время сварки или до сварки на холостом ускоренном проходе по исходной программе с запоминанием величины отклонений либо откорректированной программы.

Для каждого экземпляра изделия реализацию случайной вектор-функции, характеризующей текущую коррекцию положения и ориентации горелки относительно изделия (по сравнению с текущим программным ее положением и ориентацией), с целью компенсации случайных отклонений линии соединения от программного положения.

Для швов с большим радиусом кривизны требуемые изменения ориентации горелки относительно расчетного положения линии соединения малы, а их влияние на ка-



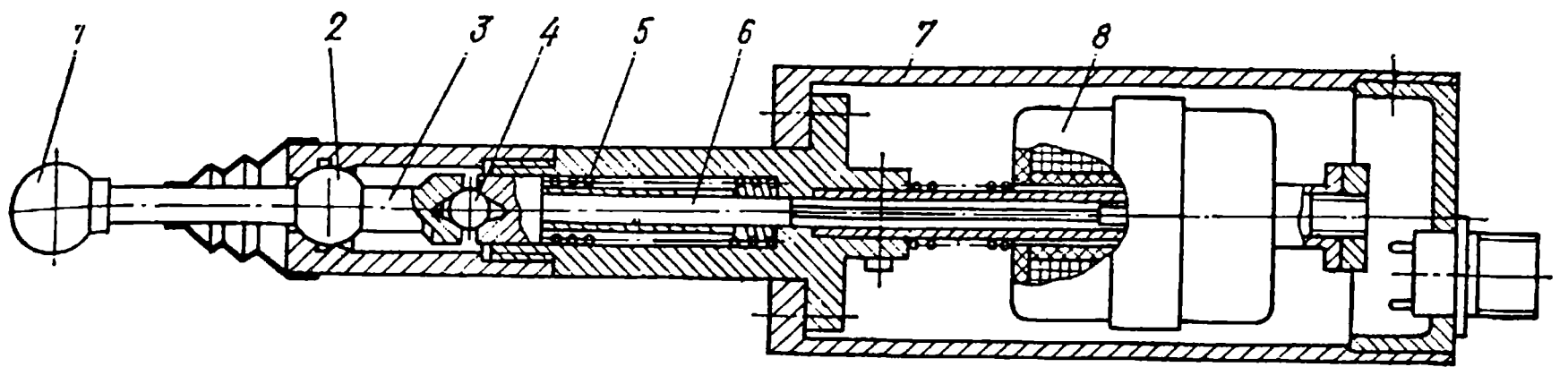


Рис. 6.11. Конструктивная схема электромеханического тактильного датчика поиска базовых точек

Для швов, имеющих участки с малым радиусом кривизны, и с углами нельзя пренебречь требуемыми изменениями ориентации горелки, связанными с отклонением точек линии соединения от расчетного положения. В этом случае задача текущей геометрической адаптации существенно усложняется:

а) определением текущей коррекции не только положения, но и ориентации горелки относительно изделия;

б) большой скоростью изменения переносных и ориентируемых координат при сварке на закруглениях и углах;

в) техническими трудностями получения информации о положении линии соединения на закруглениях малого радиуса и углах. Поэтому для швов с малыми радиусами кривизны целесообразным является комбинированное решение задачи адаптации, основанные на том, что участки с малым радиусом кривизны и углами рассматриваются как случайным образом смещенные в пространстве параллельно самим себе без искажения формы.

В состав технических средств адаптации роботов для сварки входят датчики положения свариваемых элементов. В качестве таковых в тех случаях, когда линия соединения может рассматриваться как смещенная случайным образом в пространстве без искажения ее формы и размеров, применяются тактильные датчики и датчики расстояния до поверхностей свариваемых элементов.

В качестве тактильных датчиков используют электромеханические датчики. Датчик (рис. 6.11), разработанный в Институте электро-сварки им. Е. О. Патона АН УССР, позволяет осуществлять поиск в любом направлении, перпендикулярном к оси щупа, а также вдоль оси щупа. Датчик состоит из составного корпуса 7, рычага 3 с шаровым щупом 1, полусферической опоры 2, преобразователя 8 со штоком 6, поджатым пружиной 5 влево, конусно-шарового механизма 4 для преобразования любого смещения щупа в осевое смещение штока.

С помощью пружины и конусно-шарового механизма щуп до соприкосновения с изделием удерживается в определенном положении. Шток при этом занимает крайнее левое положение (рис. 6.11). При смещении шарового щупа в любом направлении, перпендикулярном к оси, в результате соприкосновения с изделием рычаг щупа поворачивается в полусферической опоре и его правая часть смещается относительно оси датчика. Конусно-шаровой механизм преобразует это смещение в осевое смещение штока. Полусферическая опора также не препятствует смещению щупа вдоль оси вправо, что приводит к аналогичному смещению штока. Таким образом, смещение щупа в любом



направлении в результате соприкосновения с изделием можно зафиксировать с помощью электромеханического преобразователя. В зависимости от его типа выходная характеристика датчика может быть релейной, ступенчатой или линейной. Датчик может быть установлен на последнем звене манипуляционной системы (рис. 6.12), т. е. неподвижно относительно сварочного инструмента, и на других звеньях. В ряде случаев датчик выводится в рабочее положение и отводится на время сварки отдельным приводным механизмом.

Фирмой ЭСАБ (Швеция) разработан датчик с кольцевым щупом, расположенным концентрично сварочному электроду (рис. 6.13). Преимущество датчика — его применение (при определенном положении горелки) для непрерывного измерения отклонения линии соединения от программного положения.

Принцип электромеханического тактильного датчика используется в устройствах защиты сварочного инструмента от повреждения при случайном столкновении с изделием, сборочно-сварочным приспособлением или другими элементами РТК вследствие неправильного функционирования системы или ошибок оператора.

Для поиска базовых точек можно также применять струйные, индукционные и другие датчики расстояния до поверхности изделия, из которых могут создаваться блоки из трех датчиков для поиска в трех основных направлениях декартовой системы координат. Если используется один датчик, то манипуляционная система должна ориентировать его таким образом, чтобы направление измерения располагалось перпендикулярно к поверхности, на которой расположена искомая базовая точка.

В специализированных роботах для сварки в качестве устройств для пространственной адаптации применяют устройства пря-

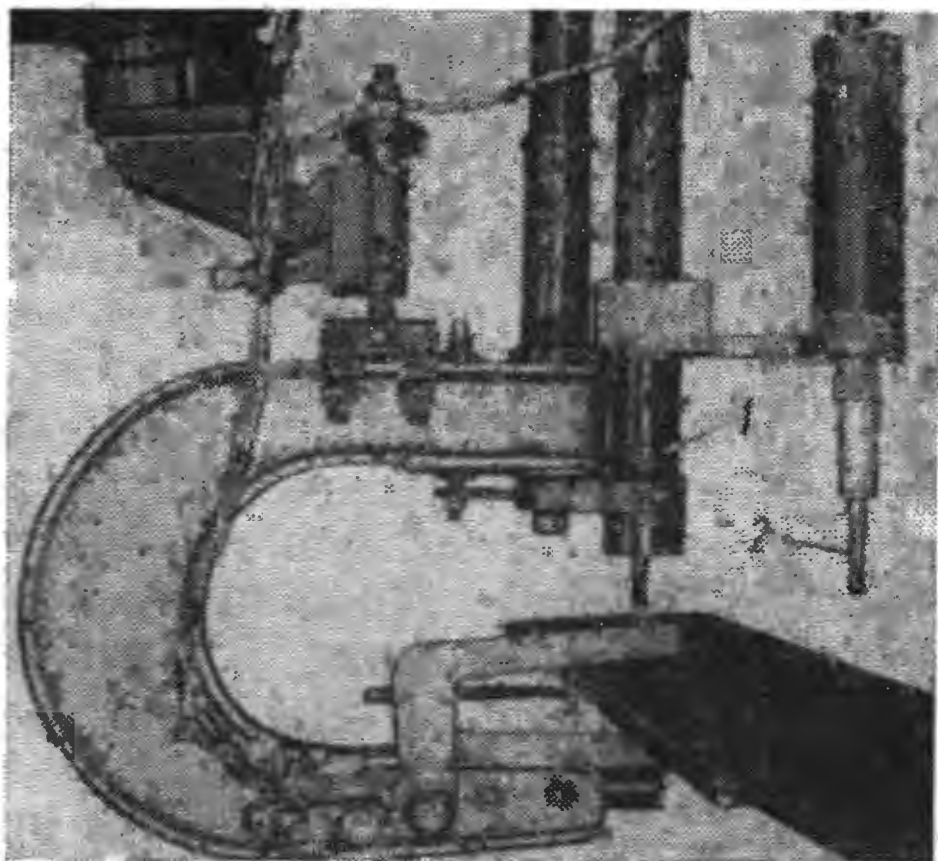


Рис. 6.12. Электромеханический тактильный датчик поиска базовых точек при сварке электрозаклепками:

1 — сварочный инструмент; 2 — щуп тактильного датчика

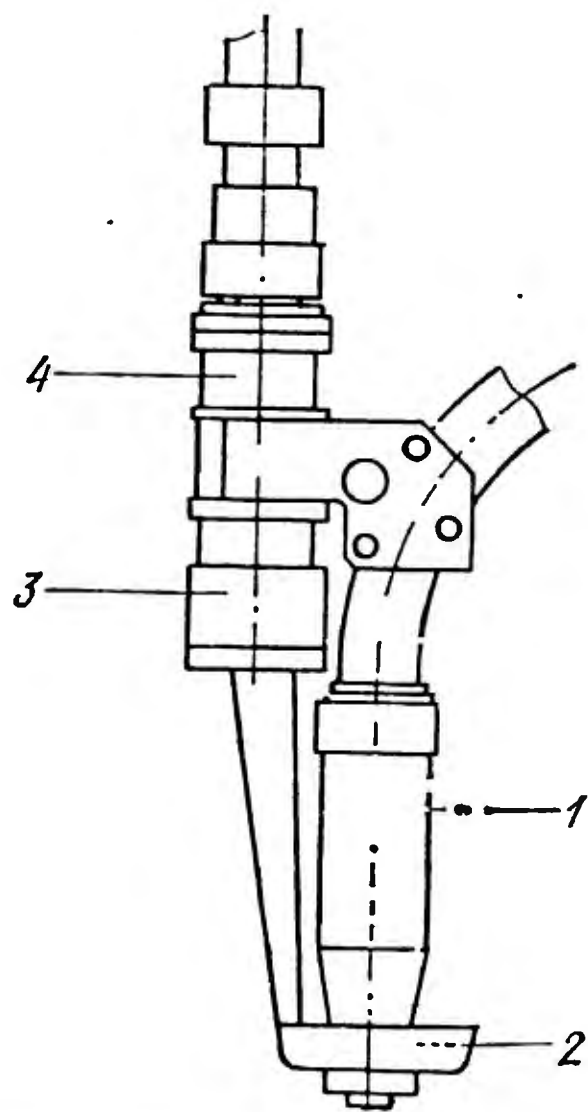
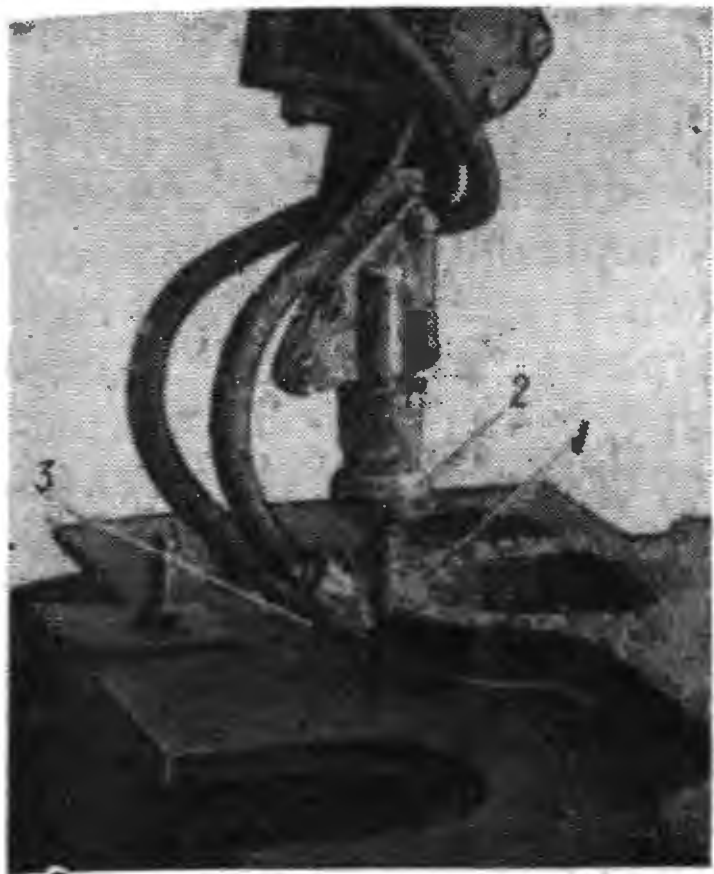


Рис. 6.13. Электромеханический датчик с кольцевым щупом, концентричной горелке:

1 — горелка; 2 — кольцевой щуп; 3 — корпус датчика; 4 — корпус первичного преобразователя

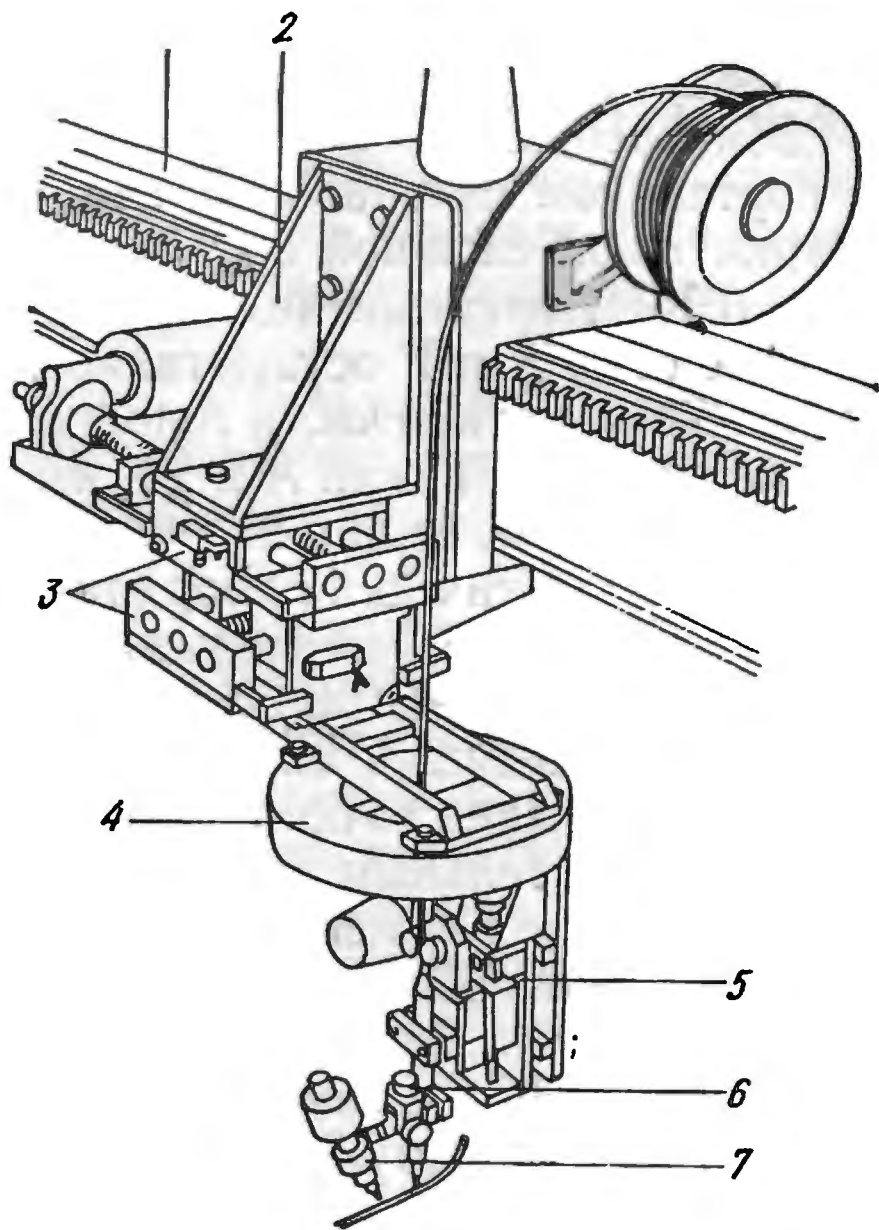


**Рис. 6.14. Устройство непрерывного прямого копирования для адаптации специализированного робота:**

1 — свариваемые элементы; 2 — копирующий палец; 3 — горелка

**Рис. 6.15. Механизм перемещения сварочной головки специализированного робота для сварки швов сложной формы, лежащих в горизонтальной плоскости:**

1 — направляющие каретки портала; 2 — кронштейн сварочной головки; 3 — суппорты корректирующие горизонтальные; 4 — корпус поворотной части сварочной головки; 5 — суппорт корректирующий вертикальный; 6 — ручной корректор положения датчика относительно сварочной горелки; 7 — электромеханический датчик положения линии соединения



мого копирования непрерывного действия. При их использовании сварочная горелка должна иметь свободную (неприводную) подвижность в одном или двух направлениях и быть жестко связанной со щупом, прижимаемым пружиной либо давлением жидкости или газа к поверхностям свариваемых элементов. Наиболее просто реализовать прямое копирование при сварке угловых швов тавровых и угловых соединений внутри угла. В качестве копирующих элементов используют ролики или пальцы (рис. 6.14), расположенные сбоку от точки сварки, либо изолированное кольцо, расположенное концентрично оси рабочей части горелки.

В системах текущей адаптации специализированных роботов применяют электромеханические датчики, используемые в системах автоматического слежения за стыком (см. § 2.7). При использовании этих датчиков точка копирования располагается перед точкой сварки (см. рис. 2.32), а применение раздвоенного щупа позволяет копировать линии таврового или внутреннего углового соединения в двух точках сбоку от точки сварки (см. рис. 2.34).

Чтобы расположить точку копирования перед точкой сварки, в общем случае необходимо:

переместить датчик вдоль линии соединения по программе с опережением, равным транспортному запаздыванию при перемещении точки сварки в точку измерения;

вычислить отклонение линии соединения от расчетного положения;

использовать полученную информацию для корректировки программы с задержкой, равной транспортному запаздыванию.

Эти требования реализованы фирмой «Мессер Грисхайм» (ФРГ) в порталном специализированном роботе «Портабот» для дуговой сварки швов сложной формы, лежащих в горизонтальной плоскости (рис. 6.15). Перемещение сварочной головки порталом и кареткой портала по осям  $X$  и  $Y$  осуществляется по программе, а адаптация — смещением поворотной части головки корректирующими суппортами (также в направлении осей  $X$  и  $Y$ ), имеющими ход  $\pm 50$  мм каждый. Фактические координаты линий соединения в точке измерения определяются как сумма фактических координат точки сварки и текущих координат точки измерения относительно точки сварки. Текущие координаты точки сварки в горизонтальной плоскости определяются с помощью измерительной следящей системы, содержащей датчик положения линии соединения перед точкой сварки на постоянном расстоянии от последней. Исполнительным приводом этой следящей системы является привод вращения нижней части сварочной головки относительно точки сварки. С помощью того же датчика определяется отклонение поверхности изделия в вертикальном направлении для управления корректирующим вертикальным суппортом. Для непрерывной сварки закруглений малого радиуса, а также на углах рассмотренный способ не применяют.

В качестве измерительных устройств средств адаптации роботов для дуговой сварки перспективны электромагнитные датчики положения соединения, подготовленного под сварку. Применение этих датчиков накладывает ограничения на технику сварки роботами, а именно: не позволяет вести сварку с текущей адаптацией на угловых участках внутри коробчатых конструкций; для текущей адаптации при сварке угловых соединений внутри и снаружи необходимо изменение положения датчиков; существенно ограничивается возможность сварки с поперечными колебаниями горелки.

При дуговой сварке перспективны сенсорные системы с использованием сварочной дуги в качестве датчика расстояния до поверхности свариваемых элементов (см. рис. 2.41). Сканирование дуги поперек линии соединения при сварке угловых швов позволяет определить смещение оси электрода в поперечном направлении и вдоль оси электрода [52]. Информация о поперечном смещении содержится в разности сварочных токов в крайних точках или разности интегральных значений токов за время нахождения электрода слева и справа от среднего положения. Информация о продольном смещении электрода содержится в разности суммарного значения указанных токов и некоторой эталонной величины. Колебания электрода осуществляются манипулятором сварочной горелки. Для задания колебаний необходимо при обучении ввести в память их амплитуду и частоту, при этом система управления обеспечивает ориентацию колебаний в пространстве перпендикулярно к линии сварочного движения.

Сенсорные системы с использованием сварочной дуги в качестве датчика имеют основные достоинства: непосредственное измерение в точке сварки, что исключает погрешности, вызванные несовпадением точки измерения и точки сварки; управление положением непосредст-

венно сварочной дуги, а не горелки; отсутствие в зоне сварки дополнительных устройств для измерения положения линии соединения.

Системы с использованием сварочной дуги в качестве датчика наиболее эффективны при сварке в аргоне и аргонсодержащих смесях защитных газов, когда дуговой процесс наиболее стабилен. При сварке в  $\text{CO}_2$  применение этого способа затруднено ввиду нестационарности дугового процесса.

Для адаптации роботов перспективно использование видеосенсорных систем, основанных на применении различного типа фотоприемников, работающих в видимой части спектра и в инфракрасном диапазоне (см. § 2.7). Применение видеосенсоров в системах адаптации роботов для дуговой сварки в защитных газах осложняется световым излучением дуги, разбрызгиванием расплавленного металла. Один из путей преодоления этих трудностей — предварительное измерение на повышенной скорости каждого экземпляра изделия до начала сварки. Однако при этом снижается производительность процесса, а также не учитываются смещения линии соединения и искажения его геометрических параметров стыка вследствие тепловых деформаций при сварке.

Чтобы измерить каждый экземпляр изделия во время сварки, применяют специальные осветители и фильтры, в частности, с модулированным световым потоком, что позволяет уменьшить помехи от светового излучения дуги. Необходимо также принимать специальные меры по защите оптики видеосенсоров от загрязнения и эрозии.

Одним из перспективных путей снижения чувствительности к световым помехам является использование монохроматического освещения с помощью лазера.

## **6.5. Особенности использования роботов для автоматизации сварочных процессов**

Роботы — наиболее сложные и дорогие средства автоматизации сварочного производства. Поэтому необходимо особенно тщательно подходить к подбору объектов роботизированной сварки и созданию условий для эффективного использования робототехники. Наряду с рациональным выбором сварных конструкций в качестве объекта роботизированной сварки необходимы обеспечение производства соответствующей технологической оснасткой, оптимальная организация операций, связанных с подачей изделия в позицию сварки и из позиции сварки, выбор способа и места сборки под сварку элементов конструкции, организация концентрированного применения роботов, выбор степени интеграции операций и т. д.

*Выбор сварных конструкций в качестве объектов роботизированной сварки* определяется функциональными возможностями сварочных роботов и, прежде всего, возможностями автоматизации сварки изделий со швами сложной формы или большим числом коротких швов, в том числе различным образом расположенных в пространстве. Это объемные конструкции — корпуса, крышки, кронштейны, каркасы, рамы и балки сложной формы, тройники и др. Основной тип швов — угловые. Главным техническим ограничением при выборе сварной конструкции в качестве объекта роботизации является не сложность ли-



ний швов и формы изделия, а значения случайных отклонений линии сопряжения свариваемых элементов и геометрических параметров соединения, собранного под сварку, от запрограммированных значений из-за характерных для сварочного производства погрешностей обработки заготовок и их сборки, а также вследствие сварочных деформаций. Это обстоятельство требует применения методов геометрической и технологической адаптации, которые существенно усложняют и удорожают роботизацию.

В настоящее время общее техническое решение задачи геометрической адаптации отсутствует вследствие сложности создания достаточно компактного и надежного датчика универсальной сенсорной системы. Еще большие сложности возникают при создании систем технологической адаптации. Учитывая сложность решения задач адаптации, необходимо, приступая к роботизации сварочного производства, в первую очередь подвергнуть тщательному анализу объект сварки и технологию его изготовления, начиная с заготовительных операций. При этом необходимо, если это технически и экономически оправдано, таким образом изменить технологию и конструкцию изделия либо его составных элементов, а также технологическую оснастку, чтобы обеспечить стабильное положение линии и параметров сопряжения свариваемых элементов в рабочей зоне РТК. Особое внимание должно быть уделено рациональному выбору или созданию установочных баз, по которым изделие или его элементы можно стабильно зафиксировать при сварке.

Чтобы устранить влияние погрешностей изготовления на отклонения нескольких удаленных друг от друга швов от их программного положения, в отдельных случаях можно использовать метод перемены баз, при котором изделие при сварке различных швов фиксируется по различным базам, каждая из которых достаточно точно определяет положение соответствующего шва или группы швов. Применительно к условиям роботизации оптимальным решением является автоматическая перемена баз (рис. 6.16).

*Транспортировка изделия в позицию и из позиции сварки* может выполняться автоматическими механизированными средствами либо вручную. Ручная загрузка и выгрузка допустима при малой массе транспортируемых деталей и может быть оправдана лишь при частой смене объектов производства.

В качестве транспортных средств в робототехнических комплексах целесообразно применять универсальные, легко переналаживаемые устройства с тем, чтобы узкая специализация транспорта не сужала возможностей РТК в отношении простоты переналадки на другое изделие. Такими транспортными средствами являются транспортные роботы [32] и сбалансированные манипуляторы.

Транспортные роботы обеспечивают полную автоматизацию загрузочно-разгрузочных работ, но для их применения необходима полная упорядоченность движения заготовок и сварных конструкций в пространстве и во времени, т. е. необходимые заготовки и готовые конструкции должны появляться в заданных местах пространства в заданном положении и в заданное время цикла. Обеспечение упорядоченности движения объектов труда малоэффективно, если оно охватывает

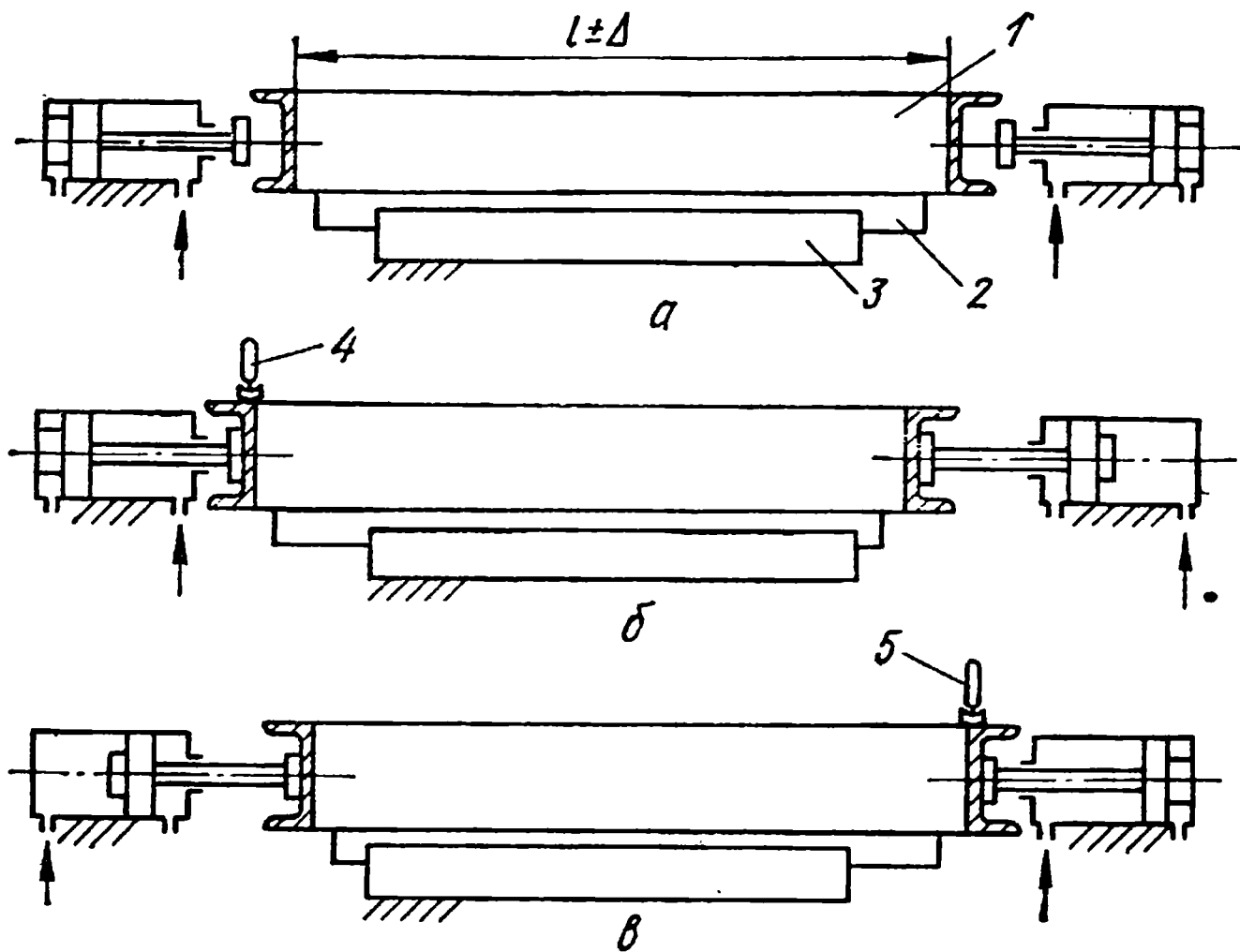


Рис. 6.16. Схема использования метода перемены баз:

*а* — до базирования; *б* — с базированием по левому привариваемому элементу; *в* — то же, по правому элементу; 1 — свариваемое изделие; 2 — подвижная плита приспособления; 3 — неподвижная плита приспособления; 4, 5 — программируемые положения горелки при сварке соответственно на левой и правой базах.

только одну операцию, и становится весьма эффективным, если распространяется на весь процесс изготовления изделия. Наиболее простое средство упорядочения — использование ориентирующей тары, которая, поступая в рабочее пространство РТК, базируется здесь в заданном положении.

Для изделий сложной формы, автоматическая ориентация которых при транспортировке и в позициях сварки затруднена, могут применяться приспособления-спутники, имеющие удобные для ориентации базовые элементы. Укладка изделий в ориентирующую тару или в приспособление-спутник выполняется с участием рабочего только один раз — в начале процесса изготовления. Изделия простой формы (планки, пальцы, бобышки, втулки) при крупносерийном производстве могут подаваться из магазинов, куда они загружаются в ориентированном положении, а мелкие детали типа тел вращения могут ориентироваться автоматически в устройствах, имеющих бункерную загрузку «навалом».

*Выбор способа и места сборки изделия под сварку* зависит от соотношений продолжительностей операций сборки и сварки, возможности организации многостаночной работы на роботизированных рабочих местах, конструктивных особенностей сварной конструкции и сборочно-сварочного приспособления, принятой последовательности изготовления (сначала полная сборка, а затем сварка или сборка и сварка методом постепенного наращивания).

Сборку на отдельном рабочем месте целесообразно применять, когда невозможна сварка в приспособлении без предварительной сборки конструкции на прихватках и время сборки невелико по сравнению со



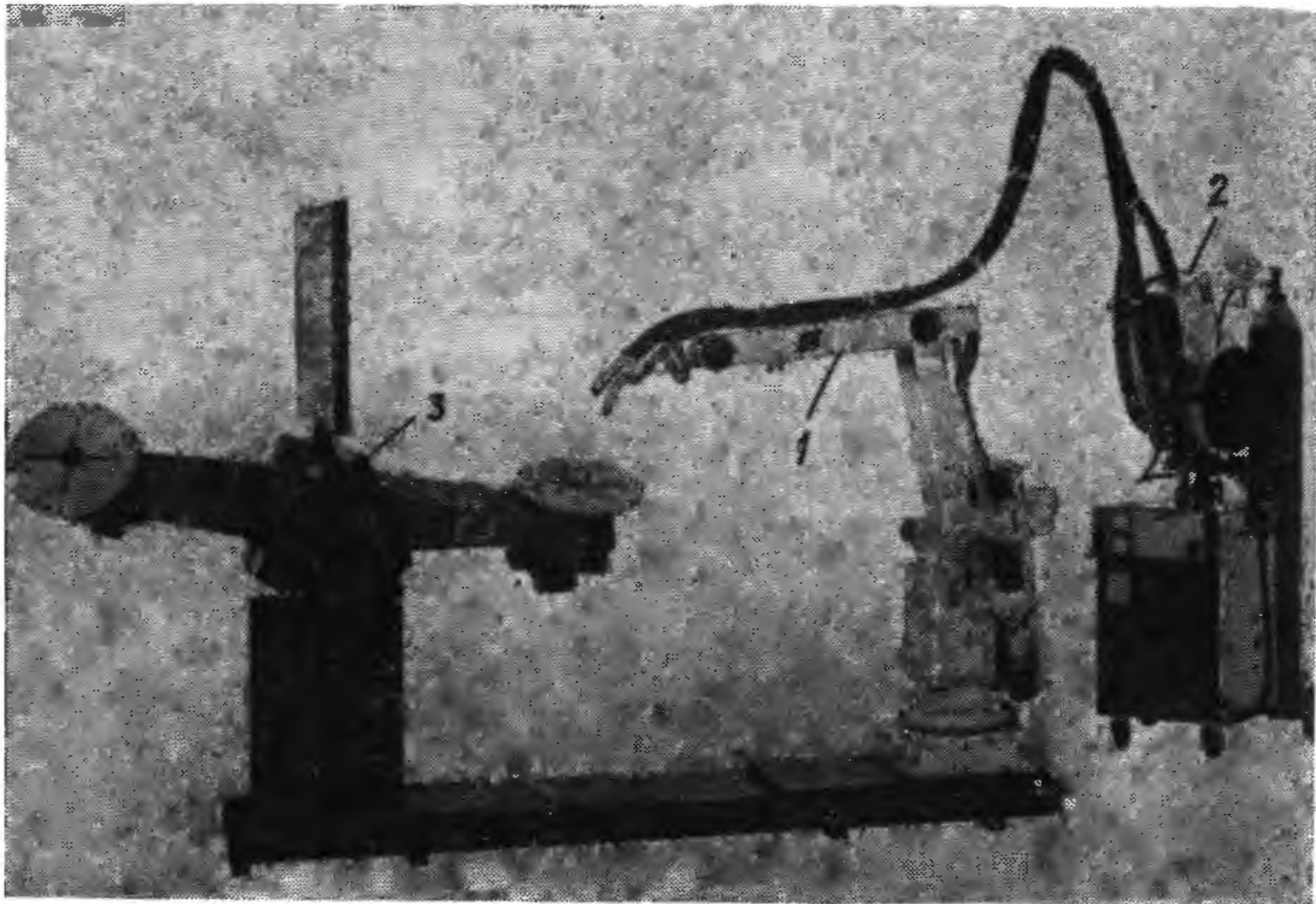


Рис. 6.17. Робототехнический комплекс фирмы ЭСАБ (Швеция) для дуговой сварки с двухпозиционным столом:

1 — манипулятор горелки; 2 — сварочное оборудование; 3 — двухпозиционный стол с манипуляторами изделий

временем сварки, а также трудно осуществить многоместное обслуживание на роботизированных рабочих местах.

Если можно организовать многопостовую работу, при которой несколько РТК обслуживаются одним оператором, то можно произвести сборку в сборочно-сварочных приспособлениях непосредственно на РТК и при малом времени сборки. Сборку в сборочно-сварочных приспособлениях на РТК применяют также, если время сборки соизмеримо со временем сварки. В этом случае робот и сборщик-оператор загружены практически полностью.

Для повышения производительности используются компоновки РТК с двух- и многопозиционными столами, в первую очередь для изделий небольших габаритов (рис. 6.17), а также двухместные компоновки для крупногабаритных конструкций.

*Концентрированное применение роботов* — важнейшее организационное мероприятие, обеспечивающее эффективность их использования. Оно основано на применении в одном производстве достаточно большого количества средств робототехники и создания участков из роботизированных рабочих мест, роботизированных линий, а в дальнейшем — комплексных роботизированных производств по изготовлению сварных конструкций и гибких производственных систем.

Для технического обслуживания сварочных роботов необходимы специалисты-наладчики системы управления, операторы-программисты, высококвалифицированные механики и электрики по обслуживанию манипуляционных систем, приводов, сварочного оборудования. Их

квалификация и ответственность увеличиваются, если они заняты обслуживанием только роботизированных рабочих мест. Как показывает опыт, оптимальная норма персонала для технического обслуживания сварочных РТП в настоящее время составляет 0,4—0,2 чел. на 1 робот. Поэтому для рациональной организации технического обслуживания сварочных роботов их минимальное количество должно составлять 10—20 единиц. В расчет не принимаются операторы, выполняющие загрузочно-разгрузочные и сборочные работы на тех роботизированных позициях, где эти работы не автоматизированы. Концентрированное применение роботов создает предпосылки для применения систем группового управления роботами как единой гибкой производственной системой.

*Интеграция операций в роботизированном производстве сварных конструкций*, в противовес дифференциации операций, может стать одним из путей повышения эффективности роботизации. Роботы позволяют реализовать принцип как можно более полной обработки изделия на одном рабочем месте без переустановки. Этот принцип широко применяют в обработке металлов резанием в виде так называемых обрабатывающих центров — многооперационных станков с числовым программным управлением. Отличие робототехнического комплекса для сварки от обрабатывающего центра состоит в том, что различные сварные швы одной конструкции могут быть в большинстве случаев выполнены с помощью одного сварочного устройства на различных режимах, тогда как обрабатывающие центры используют для обработки различных поверхностей разные инструменты.

Сокращение числа транспортировок и переустановок изделия при изготовлении изделия на одном рабочем месте повышает производительность, способствует снижению остаточных деформаций и повышению точности изделий. Предельная интеграция операций предполагает сварку изделия полностью на одном рабочем месте, в том числе несколькими роботами (рис. 6.18).

*Проблема «привязки» роботов к условиям сварочных производств* важнейшая после проблемы освоения серийного производства средств робототехники. Затраты на внедрение роботов в производстве включают: затраты на разработку и изготовление технологической и транспортной оснастки; организационно-технические мероприятия по упорядочению потоков заготовок и изделий; модернизацию оборудования, выполняющего предыдущие, сопутствующие и последующие операции; реализацию мероприятий по технике безопасности роботизированного производства. Как показывает опыт, эти затраты могут в два раза и более превышать стоимость роботов. Высокая трудоемкость и стоимость выполнения этих работ объясняется двумя причинами:

1) в отличие от собственно сварочного робота — универсальной, легко перепрограммируемой машины — окружающие его технические средства, в первую очередь — технологическая и транспортная оснастка, предназначенная для упорядочения положения и потоков заготовок и изделий в пространстве и времени, необходимого для обеспечения работы робота, пригодны в основном только для данного изделия либо для данного типа изделий, т. е. являются специальными или специализированными;

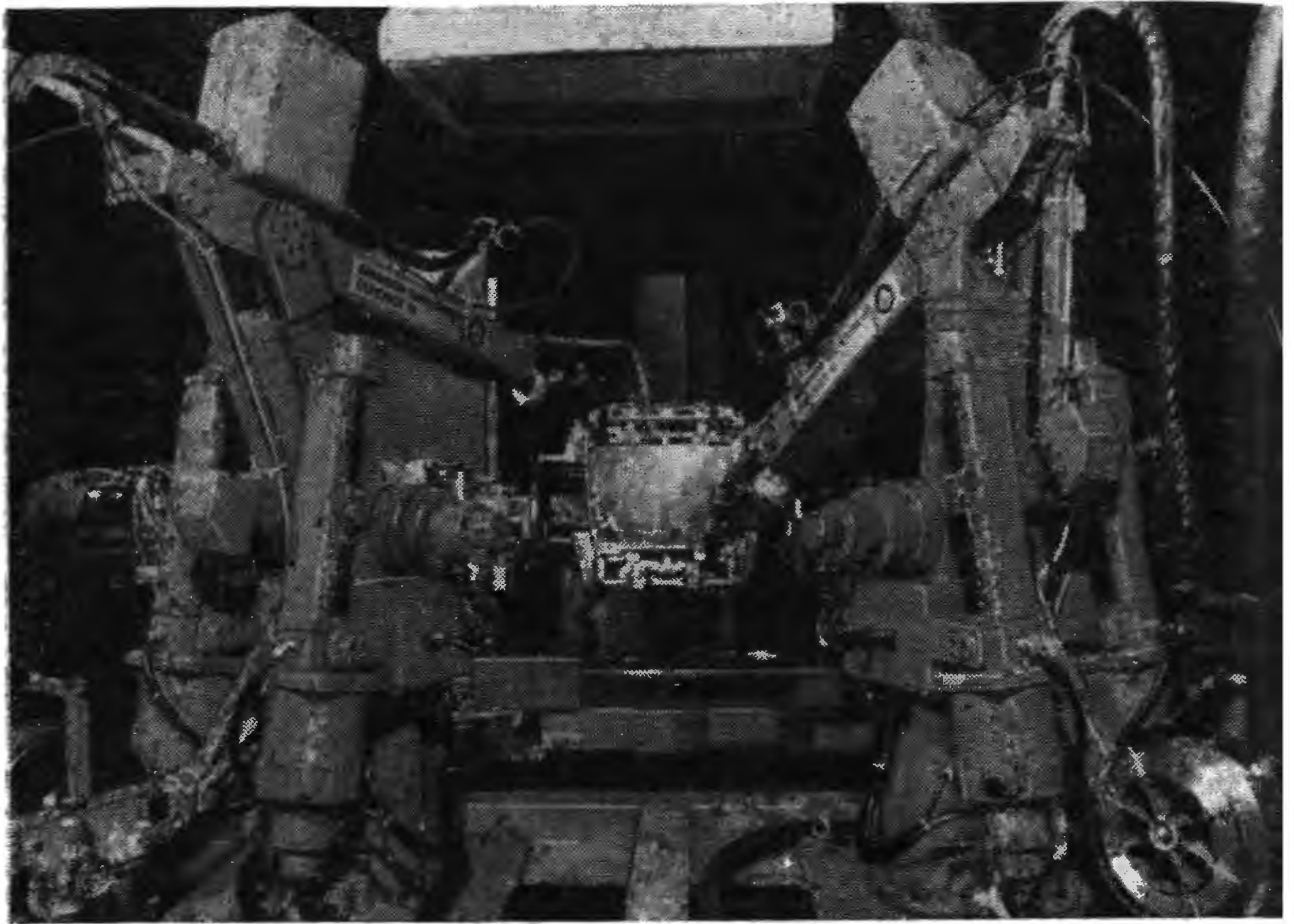


Рис. 6.18. Дуговая сварка изделия одновременно двумя роботами

2) традиционные технология, оборудование и организация производства, приспособленные к сложившемуся уровню и методам механизации и автоматизации, непригодны без существенной реконструкции для роботизации.

Эти обстоятельства — основное препятствие на пути существенного увеличения числа роботизированных рабочих мест, участков и отдельных производств даже при серийно выпускаемых средствах робототехники. Увеличение гибкости технологической и транспортной оснастки достигается двумя путями:

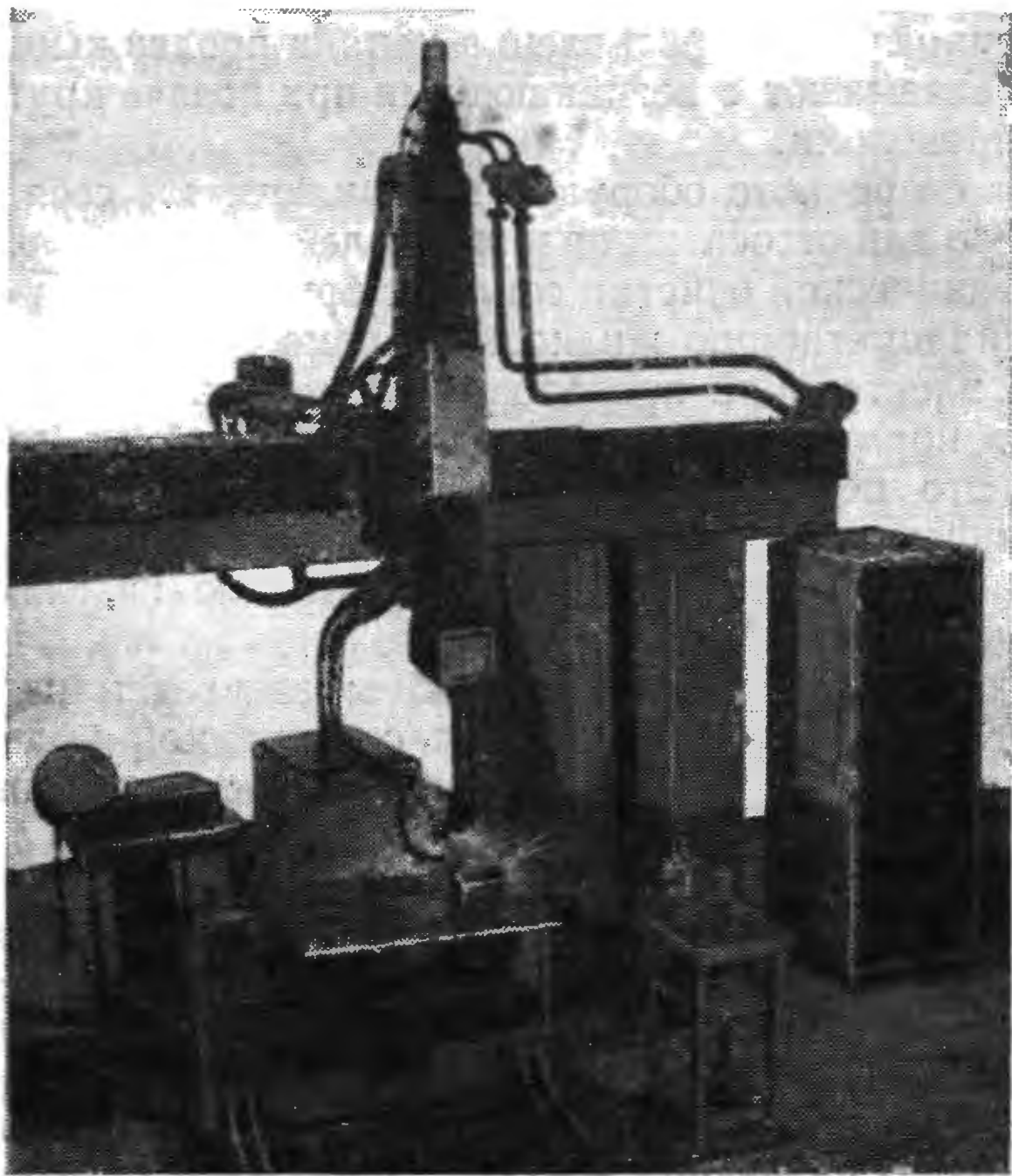
1) применением универсально-сборной оснастки, а также типовых решений по автоматической транспортировке, сборке и фиксации основных типов сварных конструкций, производство которых является объектом роботизации;

2) использованием модульного принципа компоновки роботизированных линий, участков, отдельных рабочих мест и собственно робототехнических комплексов, а также их составных частей.

Примером РТК для сварки может служить комплекс РБ-251 (рис. 6.19), созданный совместно специалистами Института технической кибернетики и робототехники Болгарской Академии наук и Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР.

РТК РБ-251 предназначен для дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах сварных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей в положениях свариваемых соединений от ниж-





**Рис. 6.19. Робототехнический комплекс РБ-251**

него до вертикального. Он состоит из манипулятора сварочной горелки, сварочного оборудования (включая свободнопрограммируемый источник сварочного тока, газоаппаратуру, устройства для механической очистки и смазки горелки), двух манипуляторов изделия.

Манипулятор горелки РТК РБ-251 обладает достаточной жесткостью, обеспечивающей высокую точность обработки траектории в большой рабочей зоне.

Сварочная аппаратура РТК РБ-251 построена на основе подающего механизма типа ИЗАПЛАН, разработанного в НРБ, по схеме тяни-толкай. Невращающаяся бухта проволоки и разматывающее устройство располагаются в удобной зоне на уровне пола или на отдельном балконе. Толкающий подающий механизм расположен возле разматывающего устройства, а тянущий — в непосредственной близости от горелки. Такая схема позволяет подавать проволоку на расстояние до 16 м. Важным применительно к РТК для дуговой сварки оказывается свойство механизма ИЗАПЛАН одновременно с подачей проволоки править ее. При этом случайное отклонение конца электродной проволоки от оси горелки на расстоянии 10 мм от нижнего среза направляющей втулки при правильно отрегулированном механизме ИЗАПЛАН лежит в пределах 0,1 мм в отличие от роликовых подающих механизмов (без дополнительных устройств для правки), при применении которых отклонение конца проволоки может достигать 1,0 мм и более. Известно также свойство механизмов типа ИЗАПЛАН способ-

ствовать уменьшению сопротивления канала продвижению в нем проволоки, что связывают с возникающими при подаче крутильными колебаниями проволоки.

Комплект сварочного оборудования включает в себя аспирационное устройство для отсоса газов и аэрозолей из зоны сварки и устройство для механической очистки сопла от брызг и смазки его погружением в противопригарную жидкость. Кроме того, предусмотрена обрезка конца электродной проволоки стационарным устройством, что обеспечивает нормирование длины выступающей из горелки части проволоки. Это необходимо для реализации начальной адаптации с использованием электрода в качестве щупа. Обрезка конца электродной проволоки способствует также повышению надежности очередного возбуждения дуги.

Управление скоростью и положением звеньев манипуляционной системы РТК РБ-251 осуществляется современной мультимикропроцессорной системой, обеспечивающей: контурное управление манипулятором горелки с линейной и круговой интерполяцией с пересчетом на заданное положение конца электрода; неизменность положения конца электрода при изменении ориентации горелки; осевое перемещение горелки, независимое от ее ориентации; применение широко распространенного языка для программирования станков с ЧПУ (код ИСО).

Одновременно обеспечивается: числовое программирование основных параметров режима сварки (напряжения, сварочного тока, частоты и амплитуды колебаний горелки, скорости сварки); возможность изменения напряжения, сварочного тока и скорости сварки при пробных сварках («горячее редактирование»); диагностика оборудования.

#### Техническая характеристика РТК РБ-251

Количество управляемых степеней подвижности . . . . .	9
В том числе:	
сварочного инструмента . . . . .	5
изделия . . . . .	2 × 2
Скорость сварки, м/ч . . . . .	7,2—72
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч . . . . .	1000—10000
Номинальный сварочный ток при ПВ 100 %, А . . . . .	400
Пределы регулирования сварочного тока, А . . . . .	60—400
Напряжение на дуге, В . . . . .	16—40
Вылет электрода, мм . . . . .	8—25
Диаметр электродной проволоки, мм . . . . .	1—1,6
Амплитуда колебаний горелки поперек шва, мм . . . . .	1—7,5
Частота колебаний горелки поперек шва, с <sup>-1</sup> . . . . .	0,2—2
Напряжение питающей сети трехфазного тока частотой 50 ± 1 Гц, В . . . . .	220/380 <sup>+10%</sup> <sub>-15%</sub>
Потребляемая мощность, кВт · А . . . . .	40
Расход защитного газа, л/ч . . . . .	300—1800
Габаритные размеры рабочей зоны, мм . . . . .	2500 × 1250 × 630

В РТК РБ-251 использован сварочный источник питания с автономным микропроцессорным управлением, обеспечивающим автоматическое изменение угла наклона внешних характеристик и оптимизацию режима сварки. РТК имеет оперативную и долговременную память на гибких магнитных дисках (на одном диске можно записать не менее 25 программ). Это позволяет создать библиотеку программ

для сварки различных изделий, периодически запускаемых в производство.

Программирование обеспечивается выносным пультом обучения, по командам которого производится установка сварочной горелки на характерные точки швов. При сварке прямолинейных швов таких точек две: начало и конец сварного шва; кольцевые швы программируются указанием трех точек — начало, конец и любая промежуточная точка шва. Криволинейные швы должны быть представлены набором прямолинейных и криволинейных участков, каждый из которых программируется указанным выше способом. Параметры режима сварки — напряжение на дуге, ток, скорость сварки — задаются цифровой клавиатурой в соответствующих единицах.

Высокая производительность РТК обеспечивается прежде всего совмещением во времени операций сварки одного изделия с операциями установки, сборки, прихватки и транспортировки другого изделия (при комплектации РТК двумя манипуляторами изделия). При сварке крупногабаритных конструкций можно применять один манипулятор изделия. В этом случае повышение производительности труда обеспечивается организацией многоместного обслуживания.



### 1. Управляемый электропривод систем автоматки сварочных установок

Электропривод постоянного тока. Электропривод сварочных установок работает в условиях изменений в широком диапазоне нагрузки, колебаний напряжения сети от  $-10$  до  $+5\%$  от номинального и изменений окружающей температуры от  $-10$  до  $+40$  °С. В этих условиях привод постоянного тока должен обеспечивать плавное регулирование частоты вращения с кратностью  $1 : 10$  (иногда  $1 : 20$ ) с точностью не хуже  $10\%$ .

Упрощенная схема привода, предназначенного для управления подачей электродной проволоки, показана на рис. П.1. Настройка частоты вращения, а следовательно, и скорости подачи электродной проволоки в этой схеме осуществляется потенциометром *RP*, задающим выходное напряжение усилителя-преобразователя *У1*. Изменение направления вращения обеспечивают реле *K1* и *K2*. Переключатель *S2* служит для переключения режимов работы схемы с автоматического «А» на наладочные «Н».

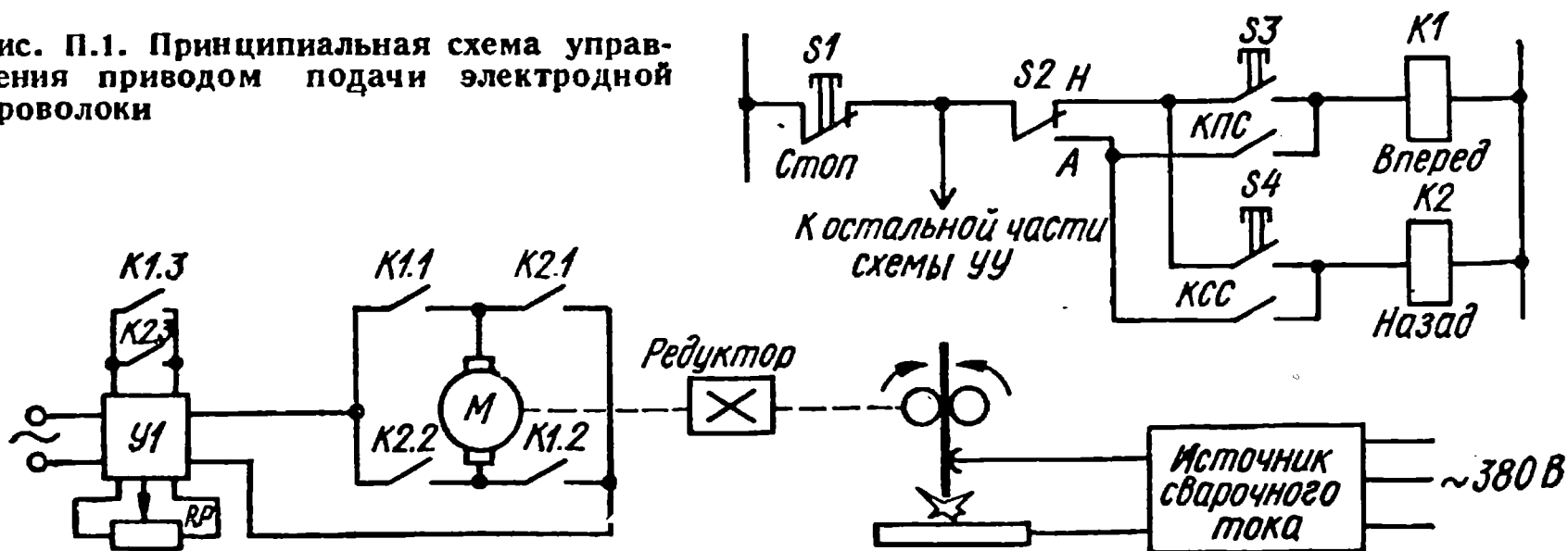
Контактом реле «пуск сварки» *KПC* включается подача электродной проволоки, а контактом реле «стоп сварки» *KСC* производится отрыв разогретого конца электродной проволоки от свариваемого металла. Толчковые кнопки *S3* и *S4* служат для наладочных перемещений электродной проволоки и работают при положении переключателя *S2* в режиме наладки. На рис. П.1 приведена только часть схемы *УУ*, показывающая управление приводом, поэтому обмотки реле *KПC* и *KСC* и их цепи управления на схеме не показаны.

Рассмотренная схема представляет собой наиболее простой случай применения управляемого привода в сварочном оборудовании.

Аппаратура управления приводом должна надежно функционировать в условиях помех, создаваемых сварочным процессом. В настоящее время наиболее распространены тиристорный привод с импульсно-фазовым управлением.

На рис. П.2 изображена упрощенная схема тиристорного привода, применяемая на отечественных шланговых полуавтоматах и автоматах. Для регулирования скорости вращения якоря двигателя в схеме используется принцип фазового управления тиристорами. Фазовый сдвиг управляющего сигнала на управляющих электродах тиристоров относительно анодного напряжения осуществляется при помощи фазосдвигающей цепи, состоящей из резистора *R3*, транзистора *VT2* и конденсатора *C1*. Пороговое устройство собрано на транзисторах *VT3*, *VT4*, а элементы схемы *C1*, *VT2*, *R3*, *R7*, *R8*, *VD2* представляют собой мост, в диагональ которого включен базово-эмиттерный переход транзистора *VT3*, а в точки соединения *C1* и *R7*, *VD2* и *R3* подается питающее напряжение. Во время заряда конденсатора *C1* напряжение в плечах моста распределяется таким образом, что на эмиттере транзистора *VT3* появляется положительный потенциал, а на базе — отрицательный. Нормально транзистор *VT3*

Рис. П.1. Принципиальная схема управления приводом подачи электродной проволоки



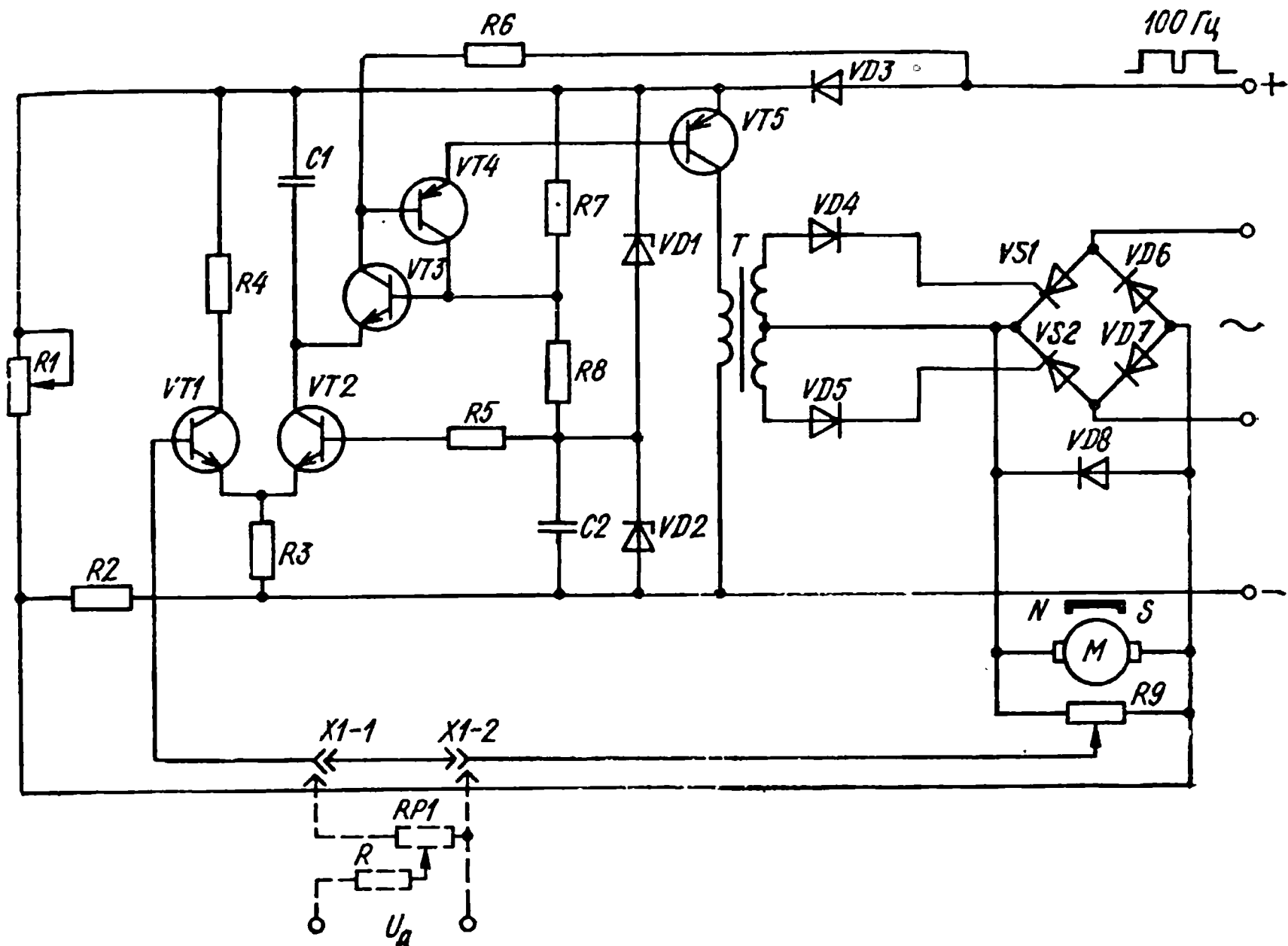


Рис. П.2. Тиристорный электропривод с импульсно-фазовым управлением

заперт. Мост рассчитан таким образом, что как только конденсатор  $C1$  зарядится до напряжения 8 В, на эмиттере транзистора  $VT3$  появляется минус, а на базе — плюс, через его базово-эмиттерный переход начнет протекать ток и он открывается. Коллекторный ток транзистора  $VT3$  открывает транзистор  $VT4$ , а коллекторный ток транзистора  $VT4$  усиливает базовый ток транзистора  $VT3$ . Происходит лавинообразный процесс открытия транзисторов  $VT3$  и  $VT4$ .

Для надежной работы порогового устройства и повышения его помехоустойчивости на базу транзистора  $VT4$  через резистор  $R6$  подается положительное напряжение смещения, снимаемое со стабилитрона  $VD3$ , включенного в прямом направлении. Конденсатор  $C1$  практически мгновенно разряжается через транзисторы  $VT3$ ,  $VT4$  на базово-эмиттерный переход транзистора  $VT5$ . В коллекторную цепь этого транзистора включена первичная обмотка импульсного трансформатора  $T$ . Управляющий сигнал представляет собой импульсы напряжения, которые снимаются со вторичных обмоток импульсного трансформатора  $T$ . Положительные импульсы поступают на управляющие электроды тиристоры,  $VS1$ ,  $VS2$ , а отрицательные срезаются диодами  $VD4$ ,  $VD5$ .

Чтобы достичь линейной зависимости скорости вращения двигателя от задающего сигнала, необходимо напряжение заряда на конденсаторе  $C1$  изменять по линейному закону. Для получения линейного напряжения на конденсаторе он должен заряжаться постоянным по величине током. Но ток заряда конденсатора и напряжение на нем изменяются по экспоненциальному закону. Поэтому для линеаризации напряжения на конденсаторе последний заряжается через нелинейный элемент-транзистор  $VT2$ .

Напряжение на базе транзистора  $VT2$  стабилизировано стабилитроном  $VD2$ . Поскольку выходные характеристики транзистора почти горизонтальны, ток через транзистор мало изменяется при изменении напряжения на коллекторе. Постоянная времени цепи заряда конденсатора  $C1$  изменяется при помощи усилителя, собранного на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ . В эмиттерах транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  включен общий резистор  $R3$ , через который протекают коллекторные составляющие токов обоих транзисторов. Напряжение на базе транзистора  $VT2$  стабилизировано, поэтому изменение напряжения на базе транзистора  $VT1$  вызывает перераспределение токов коллекторов транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ .

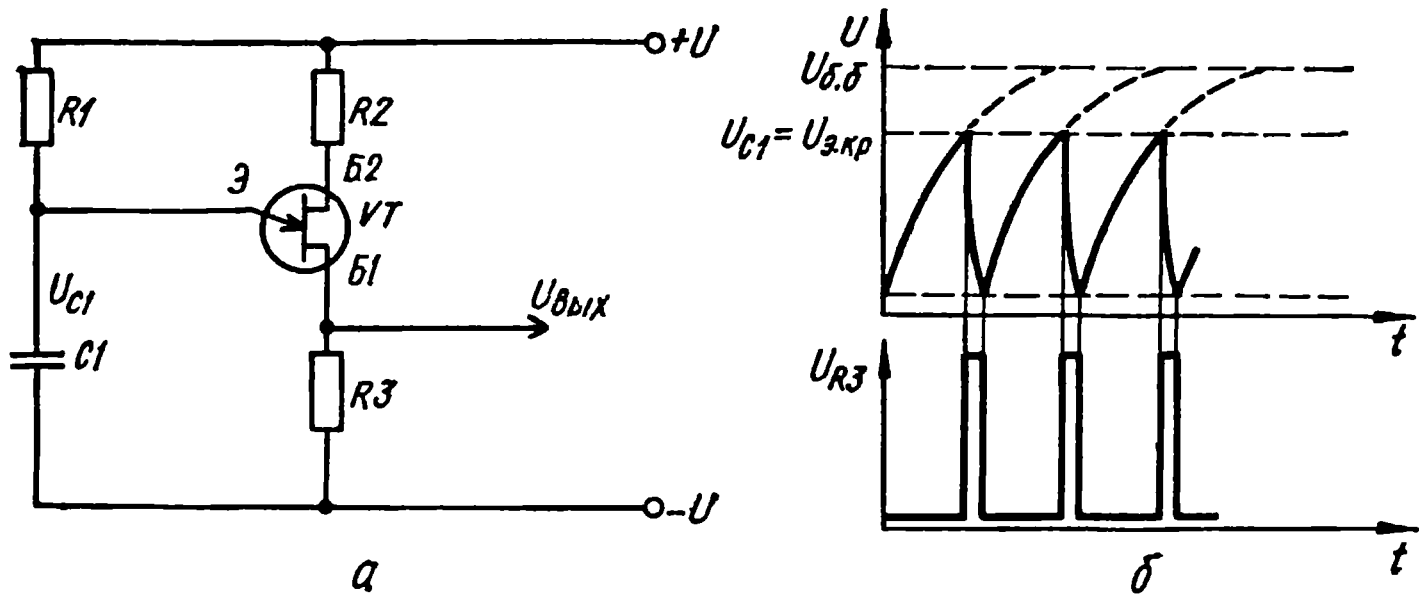


Рис. П.3. Однопереходный транзистор:  
а — схема включения; б — графики напряжений

При изменении тока коллектора  $VT2$  изменяется постоянная времени заряда конденсатора  $C1$ . Напряжение на базе транзистора  $VT1$  является входным напряжением схемы, с помощью которого осуществляется управление тиристорами. Входное напряжение представляет собой алгебраическую сумму задающего напряжения  $U_3$  и напряжения обратной связи  $U_{o.c}$  по скорости вращения. Задающее напряжение снимается с резистора  $R2$  и его можно регулировать с помощью переменного резистора  $R1$ . Напряжение обратной связи на входную часть усилителя снимается с резистора  $R9$  и пропорционально напряжению на якоре двигателя  $M$ .

При увеличении нагрузки на валу двигателя частота его вращения уменьшается, а следовательно, уменьшаются напряжения на якоре двигателя и на резисторе  $R9$ . Вследствие этого коллекторный ток транзистора  $VT1$  уменьшается, а транзистора  $VT2$  увеличивается. Этот процесс приводит к уменьшению постоянной времени цепи заряда конденсатора  $C1$  и к увеличению угла проводимости тиристоров. Напряжение на якоре двигателя увеличивается, в результате чего его обороты восстанавливаются. Аналогичным образом схема работает при увеличении частоты оборотов. Глубина обратной связи настраивается резистором  $R9$ .

В приводе предусмотрена возможность введения обратной связи по напряжению сварочной дуги. Для этого необходимо снять перемычку, соединяющую клеммы 1 и 2 на ответной части разъема  $X1$ , и присоединить к ним узел обратной связи по напряжению дуги. Глубина этой обратной связи регулируется потенциометром  $RP1$ . Синхронизация управляющего сигнала с анодным напряжением на тиристорах осуществляется путем питания схемы управления импульсным напряжением, синфазным с питанием тиристоров.

В рассмотренной схеме генератор импульсов (релаксатор) собран на транзисторах разной проводимости  $VT3, VT4$ . С появлением специальных спусковых устройств, таких как однопереходный транзистор (ОПТ) (его еще называют двухбазовым диодом), создаются предпосылки для значительного упрощения схемы управления приводом. ОПТ (рис. П.3,а) характеризуется рядом ценных свойств: более высоким значением тока эмиттера; малым током отпирания, практически фиксированным напряжением переключения. Эти свойства сохраняются в широком диапазоне температур.

ОПТ имеет три электрода: эмиттер (Э), база 1 (Б1), база 2 (Б2). Работа схемы происходит следующим образом. При заряде конденсатора  $C1$  через резистор  $R1$  до критического напряжения  $U_{з.кр}$  переход эмиттер — база 1 закрыт и через него протекает незначительный обратный ток. Как только напряжение на конденсаторе  $C1$  достигает величины

$$u_{C1} = U_{з.кр} \approx \eta u_{6,6},$$

где  $u_{6,6}$  — напряжение между базами ОПТ;  $\eta = 0,5 \div 0,9$  — передаточный коэффициент транзистора. Переход эмиттер — база 1 открывается и происходит разряд конденсатора  $C1$  на резистор  $R3$ . Этот ток в отечественных транзис-

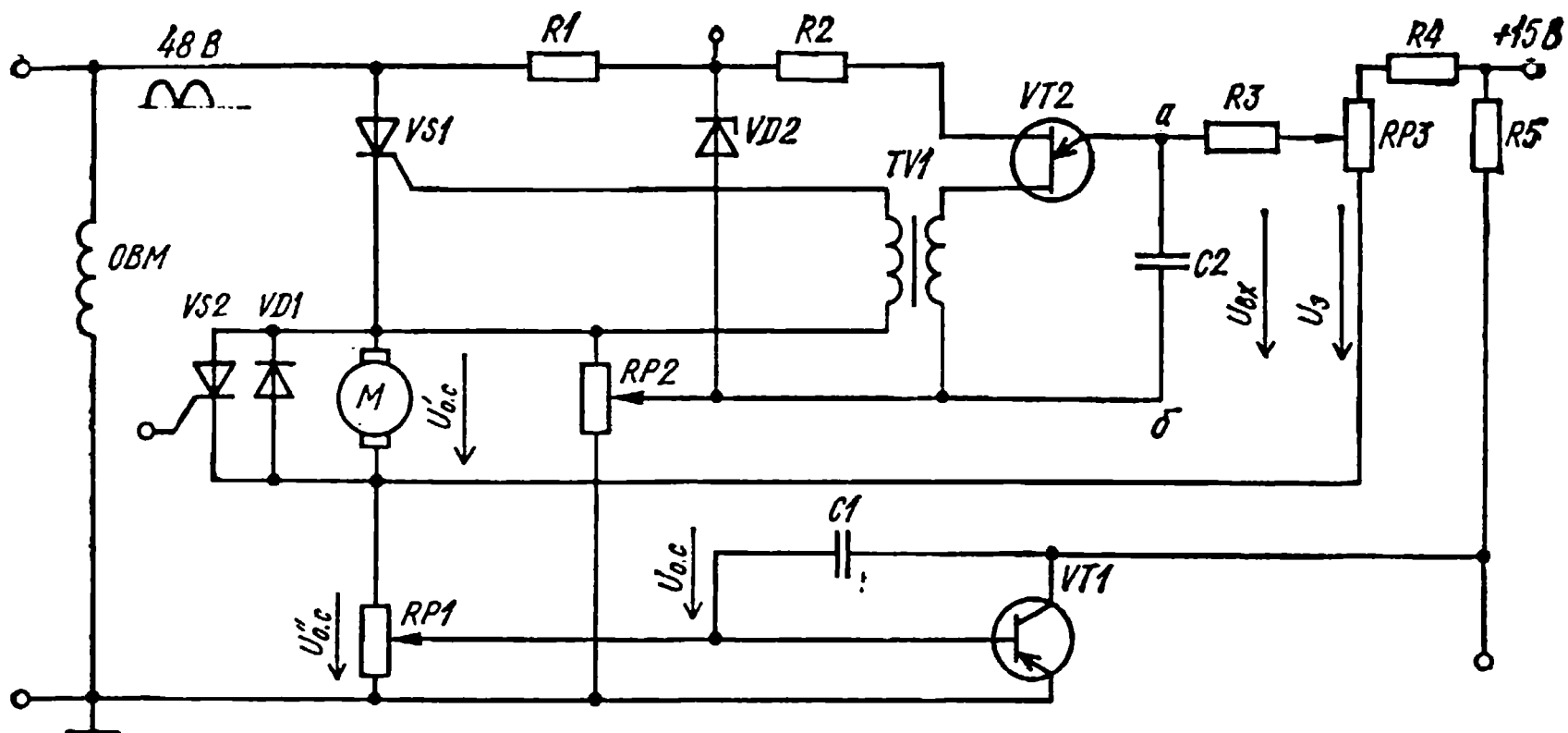


Рис. П.4. Принципиальная схема управления приводом подачи электрода полуавтомата «Интермигмаг»

торах типа КТ-117 может достигать 1 А. Типовые графики напряжений при работе релаксатора приведены на рис. П.3,б. Как только ток разряда через эмиттерно-базовый переход станет меньше 1 мА, переход закрывается и процесс повторяется.

На основе ОПТ разработана схема привода, которая применяется на всех отечественных полуавтоматах нового поколения, в том числе в приводе подачи электродной проволоки полуавтомата «Интермигмаг», разработанного странами-членами СЭВ (на рис. П.4). Получение импульсов управления тиристором  $VS1$ , который включен в цепь питания последовательно с якорем двигателя  $M$ , происходит с помощью фазосдвигающего устройства, собранного на ОПТ  $VT2$ , резисторах  $R1—R4$ , потенциометре  $RP3$ ; конденсаторе  $C2$ , стабилитроне  $VD2$ , импульсном трансформаторе  $T1$ . Потенциометр  $RP1$ , конденсатор  $C1$  и транзистор  $VT1$  выполняют функцию токовой защиты якоря двигателя  $M$  и тиристора  $VS1$  от перегрузок. Тиристор  $VS2$  служит для динамического торможения. На вход фазосдвигающего устройства (см. точки  $a$  и  $b$  схемы) подается алгебраическая сумма напряжений задания, отрицательной и положительной обратных связей:

$$u_{вх} = U_3 - u'_{o.c} + u''_{o.c} = U_3 - u_{o.c},$$

где  $U_3$  — задающее напряжение, снимаемое с потенциометра  $RP3$ ;  $u'_{o.c}$  — напряжение, пропорциональное напряжению на якоре двигателя;  $u''_{o.c}$  — напряжение, пропорциональное току якоря, снимаемое с  $RP1$ .

Напряжения  $u'_{o.c}$  и  $u''_{o.c}$  составляют напряжение обратной связи  $u_{o.c}$ , снимаемое с движка и нижнего вывода потенциометра  $RP2$ . В установившемся режиме при неизменном положении движка потенциометра задания скорости  $RP3$  якорь двигателя вращается с постоянной скоростью, напряжение на якорных клеммах и на потенциометре  $RP3$  не меняется и поэтому  $u_{вх}$  — величина постоянная. В случае увеличения нагрузки на валу двигателя частота вращения его якоря уменьшается, следовательно, напряжение  $u_{o.c}$  уменьшится, а  $u''_{o.c}$  увеличится и, как следует из приведенного выше равенства, напряжение  $u_{вх}$  также увеличится. Увеличение напряжения  $u_{вх}$  вызывает фазовый сдвиг импульса управления на выходе, тиристор  $VS1$  будет включаться раньше, что приведет к увеличению напряжения на якоре двигателя и увеличению частоты его вращения до установленного на  $RP3$  уровня.

Действие сигнала положительной обратной связи  $u''_{o.c}$  наиболее эффективно при малых оборотах якоря, когда по абсолютному значению он соизмерим с  $U_3$ . При больших частотах вращения  $U_3 \gg u''_{o.c}$ , действие  $u''_{o.c}$  значительно слабее, чем

действие  $u'_{0.c}$ . При нагрузке на валу двигателя, не превышающей допустимую, транзистор токовой отсечки  $VT1$  закрыт и не влияет на работу фазодвигателя устройства.

При увеличении тока якоря растет падение напряжения на потенциометре  $RP1$ . Движок этого потенциометра подключен к базе транзистора токовой отсечки  $VT1$  и выставлен таким образом, что при достижении током якоря полуторакратного значения от номинального транзистор  $VT1$  открывается и на выводе 2 схемы привода формируется нулевой сигнал. Этот сигнал подается на вход элементом  $DD3.1$  блока программного управления полуавтоматом (см. рис. П.11). Выходной транзистор этого элемента открывается и шунтирует цепь питания фазодвигателя устройства (вывод 3 схемы привода). Тиристор  $VS1$  закрывается, что приводит к запирающему транзистора  $VT1$ , и привод снова включается. Таким образом, в цепи якоря поддерживается некоторое среднее значение тока, не превышающее допустимое.

Для торможения двигателя в схеме предусмотрен тиристор динамического торможения  $VS2$ . Снятие задающего напряжения приводит к отключению управляющего тиристора  $VS1$  и включению тиристора динамического торможения  $VS2$ . Логическая схема, производящая эти переключения, на схеме не показана. Тиристор динамического торможения  $VS2$  шунтирует якорь двигателя  $M$ , вследствие чего он интенсивно затормаживается, в результате исключается выбег электродной проволоки.

Для получения более широкого диапазона регулирования частоты вращения и точности ее поддержания используют более сложные схемы тиристорных и транзисторных приводов. Хорошие результаты получены в системах электроприводов, использующих принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (амплитуда и частота импульсов постоянны, а длительность их изменяется). Отечественной промышленностью освоено производство комплектных тиристорных и транзисторных ШИМ-приводов, которые позволяют получить кратность регулирования частоты вращения до 10000 и более. Такие приводы находят применение в сварке, спецметаллургии, робото-технических комплексах. Исполнительный двигатель этих приводов выполнен на номинальное напряжение 110 В и имеет встроенный тахогенератор. Для большинства локальных систем авторегулирования сварочных процессов применяются двигатели серии КПК, КПА и другие, напряжение питания которых не превышает 48 В, а номинальная мощность составляет не более 250 Вт. Для таких двигателей в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР разработан ШИМ-привод (рис. П.5).

Напряжение сети 380 В преобразуется в блоке питания  $I3$  в ряд напряжений, необходимых для питания всех узлов привода, силовых цепей коммутации якоря двигателя и его обмотки возбуждения. Коммутация тока в цепи якоря осуществляется импульсным усилителем, собранным по мостовой схеме и состоящим из четырех транзисторных ключей  $VT3, VT4, VT5, VT6$ . К одной диагонали моста подключено напряжение питания 65 В, а в другую диагональ моста включен якорь двигателя совместно с потенциометром  $RP3$  тахометрического моста и резистором  $R24$  токовой защиты. Верхние ключи, собранные на транзисторах  $VT3$  и  $VT5$ , в дальнейшем будем называть ключами реверса, а нижние ключи  $VT4, VT6$  — ключами регулирования. Для защиты от напряжений инверсной полярности параллельно каждому ключу включены диоды  $VD9, VD10, VD11, VD12$ .

Частота вращения и реверс якоря двигателя регулируются с использованием обратной связи тахометрического моста, который балансируется потенциометром  $RP3$ . Выходное напряжение тахомоста подается на вход узла гальванической развязки  $11$ , а напряжение, пропорциональное току якоря, снимается с резистора  $R24$  и подается на вход узла гальванической развязки  $10$ . На выходе узла  $10$  напряжение сигнала всегда имеет положительное значение.

Управляющий сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ-сигнал) получается следующим образом. Алгебраическое суммирование задающего напряжения узла  $1$  с напряжением тахомоста и усиление полученного сигнала ошибки осуществляется инвертирующим сумматором, выполненным на микросхеме операционного усилителя  $DA1$ . Балансировка операционного усилителя  $DA1$  производится потенциометром  $RP1$ . Задающее напряжение регулируется потенциометром  $RP2$ .



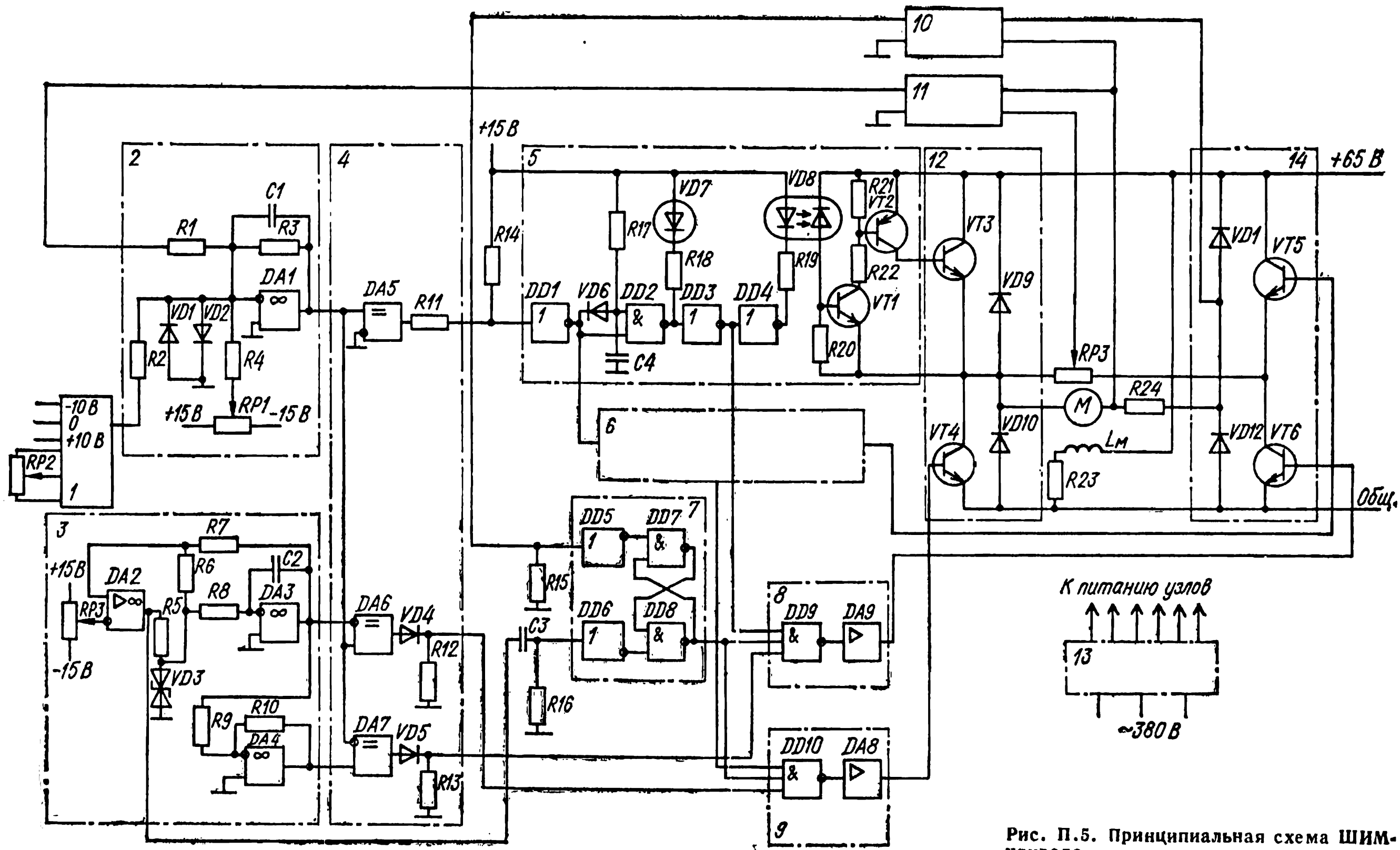


Рис. П.5. Принципиальная схема ШИМ-привода

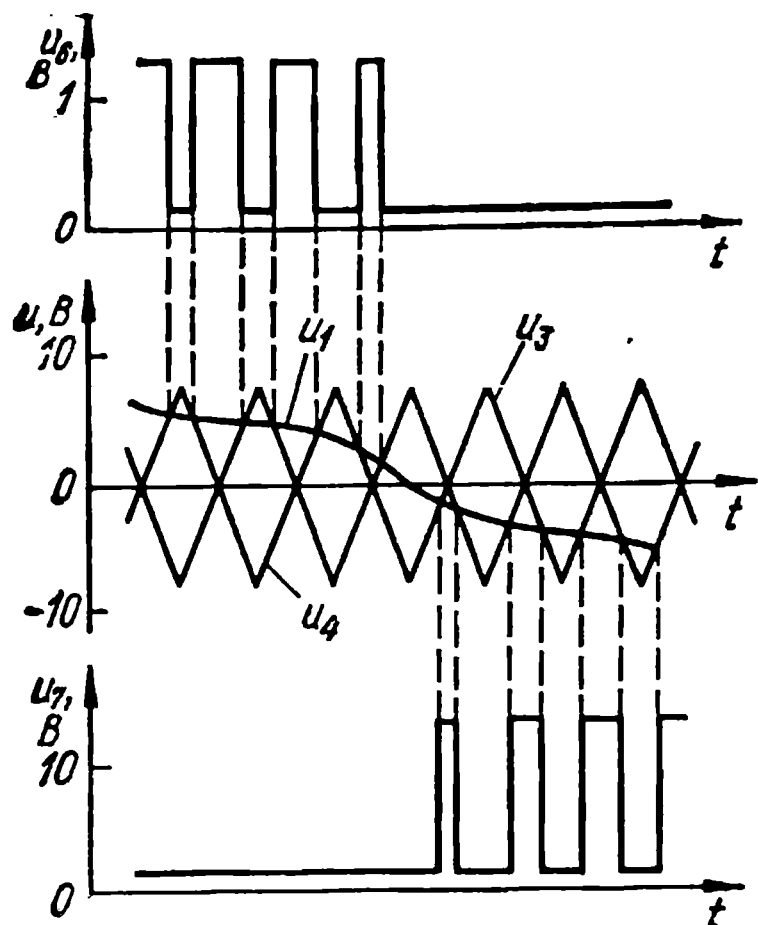


Рис. П.6. Формирование ШИМ-сигналов

Генератор опорного напряжения  $U_3$  треугольной формы выполнен на микросхемах  $DA2, DA3$ . Процесс генерирования основан на взаимодействии компаратора  $DA2$  и интегратора  $DA3$  и заключается в интегрировании стабилизированного напряжения, получаемого на  $VD3$ , и периодическом инвертировании его полярности. Импульсы напряжения треугольной формы  $U_3$  формируются на выходе интегратора  $DA3$  с частотой 2 кГц. Потенциометром  $RP3$  устанавливается такой сдвиг этого напряжения, при котором его минимальное значение равно 0 (см. рис. П.6). Для получения опорного напряжения отрицательной полярности  $u_4$  применен аналоговый инвертор, выполненный на операционном усилителе  $DA4$ .

Рассмотренная схема обеспечивает алгоритм управления ключами усилителей мощности, при котором ключ реверса открыт в течение всего времени прохождения тока якоря в одном направлении, а ШИМ-сигнал подается только на ключ регулирования. Направление тока в якоре двигателя определяется полярностью модулирующего напряжения.

Дальнейшую работу схемы рассмотрим при условии  $u_5 = 0$ , при котором ток через якорь проходит в направлении ключ реверса  $VT3$  — ключ регулирования  $VT6$ . Переход сигнала реверса на выходе компаратора  $DA5$  в состояние логического нуля является командой на включение канала управления ключами реверса 5 и 6, входная часть которых выполнена на микросхеме  $DD1$ . Поскольку запирающие ключи противоположного напряжения происходит в течение 10—15 мкс, в рассматриваемом канале управления применены элементы  $VD6, R17, C4$ , которые обеспечивают включение этого канала с задержкой на 40—50 мкс. Указанные элементы не вносят задержку при выключении канала. Индикацию состояния, в котором находится канал управления, осуществляет светодиод  $VD7$ .

Поскольку цепь управления ключом реверса находится под напряжением +65 В, дальнейшая передача сигнала управления производится через элемент гальванической развязки — оптрон  $VD8$ , который включается выходным током логического элемента  $DD4$ . На приемной стороне ток фотодиода усиливается выходным усилителем  $VT1$  и  $VT2$  подается на вход ключа реверса  $VT3$ . После включения канала управления ключом реверса  $VT3$  на выходе элемента  $DD3$  устанавливается напряжение логической единицы, которое воздействует на вход элемента  $DD9$  и дает разрешение на прохождение ШИМ-сигнала на канал управления ключом регулирования  $VT6$ . На выходе канала ШИМ-сигнал усиливается по мощности импульсным усилителем 8 и управляет проводимостью ключа регулирования  $VT6$ .

При изменении полярности модулирующего напряжения и установлении условия  $u_1 > 0$  ключ реверса  $VT3$  и ключ регулирования  $VT6$  запираются, ка-

Выходное напряжение  $u_1$  сумматора 2, которое в дальнейшем будем называть модулирующим, поступает в узел компараторов 4, собранных на микросхемах  $DA5—DA7$ .

Компаратор  $DA5$  определяет полярность модулирующего напряжения и формирует на выходе сигнал реверса  $u_5$ , который принимает значение логического нуля при  $u_1 < 0$  или логической единицы при  $u_1 > 0$ .

ШИМ-сигналы формируются компараторами  $DA6, DA7$ , на инверсный и прямой входы которых подаются соответственно опорные напряжения треугольной формы. Модулирующее напряжение сравнивается с одним из опорных напряжений, при этом в моменты равенства их мгновенных значений происходят переключения соответствующего компаратора (рис. П.6). При  $u_1 > 0$  ШИМ-сигнал формируется на выходе компаратора  $DA6$ , а при  $u_1 < 0$  — на выходе компаратора  $DA7$ .

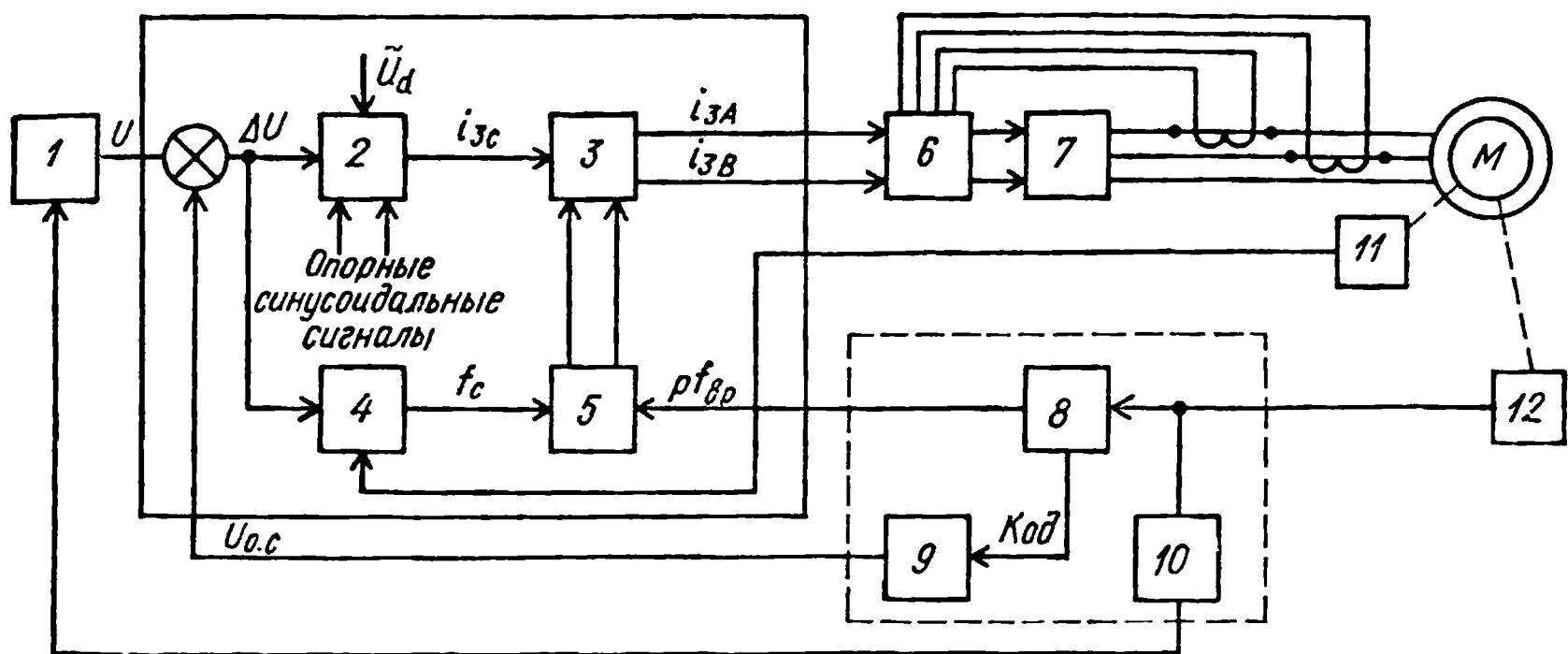


Рис. П.7. Функциональная схема регулятора положения с ЧТР-приводом

нал управления ключом реверса  $VT5$  включается, а ШИМ-сигнал с выхода компаратора  $DA6$  поступает в канал управления  $9$ ,  $DD10$ ,  $DA8$  ключом регулирования  $VT4$ . Направление тока в якоре двигателя изменяется на противоположное.

Чтобы ограничить ток в цепи якоря на допустимом уровне и обеспечить надежную работу транзисторов усилителей мощности  $VT3$ ,  $VT4$ ,  $VT5$ ,  $VT6$ , в схеме применено устройство защиты  $7$ , выполненное на микросхемах  $DD5$ — $DD8$ . Функцию порогового элемента выполняет логический элемент  $DD5$ , на вход которого поступает сигнал с узла  $10$ . Если напряжение на входе элемента  $DD5$  достигает значения логической единицы, то его выход переходит в состояние логического нуля. Это вызывает переключение триггера  $DD7$ ,  $DD8$  в состояние, при котором на его выходе устанавливается напряжение логического нуля, которое, воздействуя на элементы  $DD9$  и  $DD10$ , запирает каналы управления ключами регулирования. Триггер устанавливается в исходное состояние автоматически. Для этого из прямоугольного напряжения, которое вырабатывается на выходе компаратора  $DA2$ , при дифференцировании  $C3$ ,  $R16$  и последующем инвертировании  $DD6$  формируются короткие импульсы логического нуля с частотой  $2$  кГц.

Таким образом, в течение каждого периода широтно-импульсного регулирования контролируются мгновенные значения тока в нагрузке транзисторных ключей. Задающее напряжение, регулируемое в пределах  $-10$  В  $\div$   $+10$  В, формируется в узле  $1$ .

**Управляемый привод переменного тока.** Из всех видов электродвигателей асинхронные двигатели наиболее распространены в сварочных установках вследствие сравнительно низкой стоимости и высокой надежности. Однако в тех случаях, когда требовались плавное регулирование частоты вращения, точная остановка, программируемые пуск и торможение, вместо асинхронных двигателей использовали двигатели постоянного тока или шаговые двигатели.

В последние годы при совершенствовании микроэлектронной и силовой полупроводниковой техники все шире применяют схемы частотного управления асинхронным электроприводом [3, 19]. При этом наметились два основных направления: амплитудно-частотное регулирование (АЧР) и частотно-токовое регулирование (ЧТР), АЧР не получило заметного распространения в сварочном оборудовании из-за сложности. Схемы ЧТР для серийных асинхронных машин (например, серии 4А) обеспечивают получение регулировочных характеристик, не уступающих аналогичным характеристикам привода постоянного тока. При сравнительно низкой стоимости и высокой надежности привод с использованием ЧТР обладает дополнительными преимуществами: на всех режимах работы коэффициент мощности близок к единице; во всем диапазоне регулирования обеспечиваются жесткие механические характеристики; полоса пропускания в  $5$ — $10$  раз больше, чем у тиристорного ШИМ-привода постоянного тока.

Рассмотрим схему регулятора положения с ЧТР-приводом (рис. П.7). На входе блока управления сравниваются сигнал задания скорости перемещения  $U$  от устройства числопрограммного управления УЧПУ  $1$  и сигнал фактической

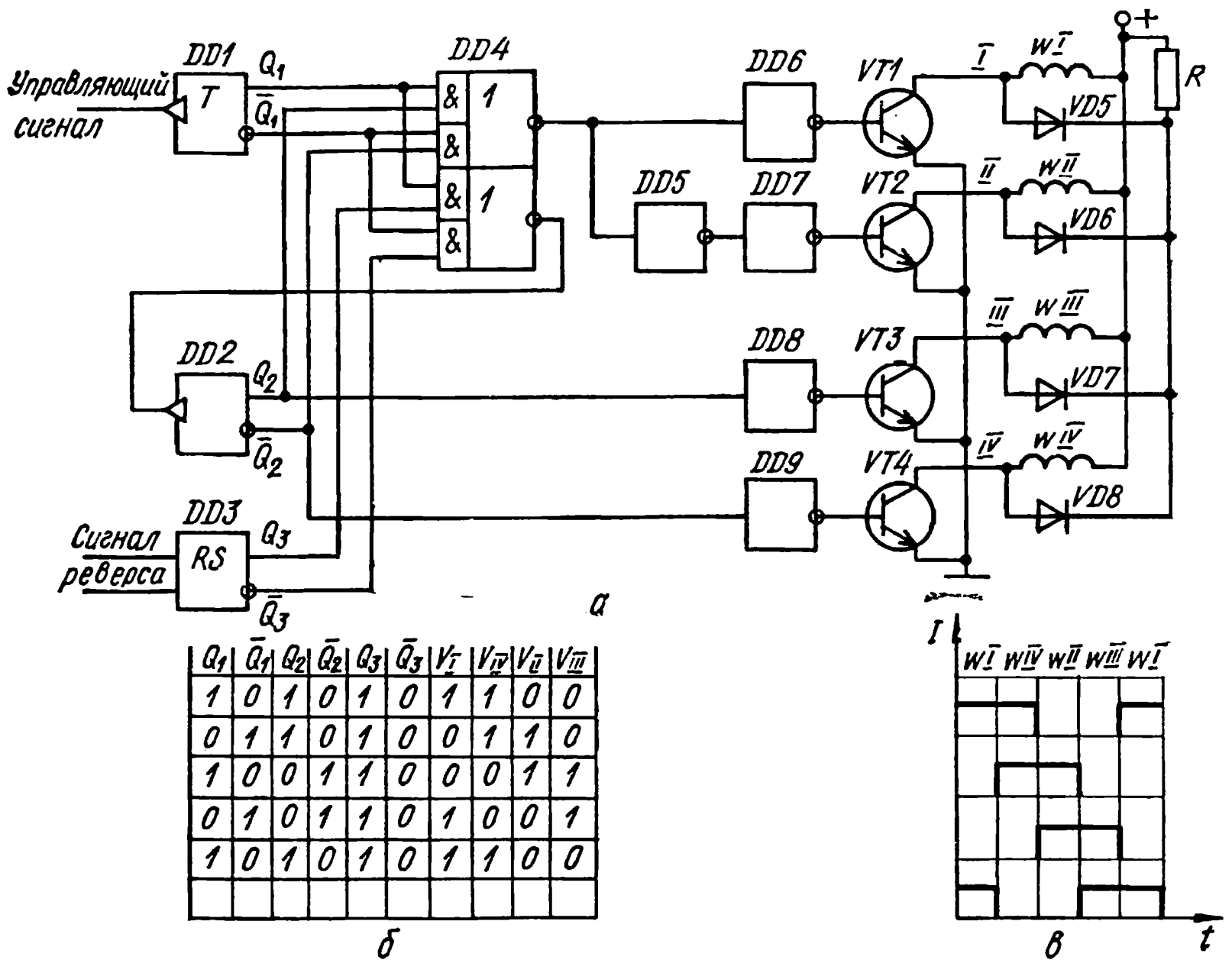


Рис. П.8. Принципиальная схема привода с шаговым двигателем

скорости  $v_{o.c}$  с выхода цифроаналогового преобразователя ЦАП 9. Результат сравнения  $\Delta u$  поступает на входы формирователя 2 амплитуды и фазы тока статора и формирователя 4 частоты скольжения. Формирователь 2 в зависимости от сигнала  $\Delta u$  и сигнала задания тока (потока) возбуждения  $U_d$  вырабатывает сигнал задания тока статора  $I_{з.с}$ . В сумматоре частот и формирователе импульсных сигналов (блок 5) частота скольжения  $f_c$  суммируется с частотой вращения ротора ( $p f_{вр}$ ) и в виде импульсных сигналов частоты  $[f_0 \pm (p f_{вр} \pm f_c)]$  с разностью фаз  $\frac{2\pi}{3}$  поступает в формирователь 3 задания фазных токов ( $f_0$  — частота 2 кГц;  $p$  — число пар полюсов двигателя).

Сигналы фазных токов  $I_{зА}$  и  $I_{зВ}$  используются в трехфазном регуляторе тока 6 и транзисторном инвенторе 7 для формирования в статорных обмотках асинхронного двигателя АД фазных токов, пропорциональных этим сигналам (ток фазы С равен сумме токов фаз А и В). В качестве датчика обратной связи используется фазовращатель 12. Формирователь частоты вращения 8 преобразует фазу сигнала с датчика 12 в код скорости перемещения (частоты вращения) и импульсные сигналы, пропорциональные скорости вращения поля ( $p f_{вр}$ ). Формирователь 10 сигналов перемещения, замыкая контур регулирования, управляет работой УЧПУ 1. Датчик температуры 11 корректирует работу формирователя 4.

Управляемый привод с шаговым двигателем. Привод с шаговым двигателем ШД применяется для точных перемещений и позиционирования механизмов сварочных установок, в том числе и промышленных роботов. Привод с ШД по сравнению со следящим приводом обладает следующими преимуществами: более простой схмотехникой, поскольку в нем отсутствуют датчики обратной связи, корректирующие элементы и т. д.; регулирование скорости от нуля до номинального значения осуществляется с сохранением синхронности и синфазности; высокой статической точностью, определяемой величиной одного шага.

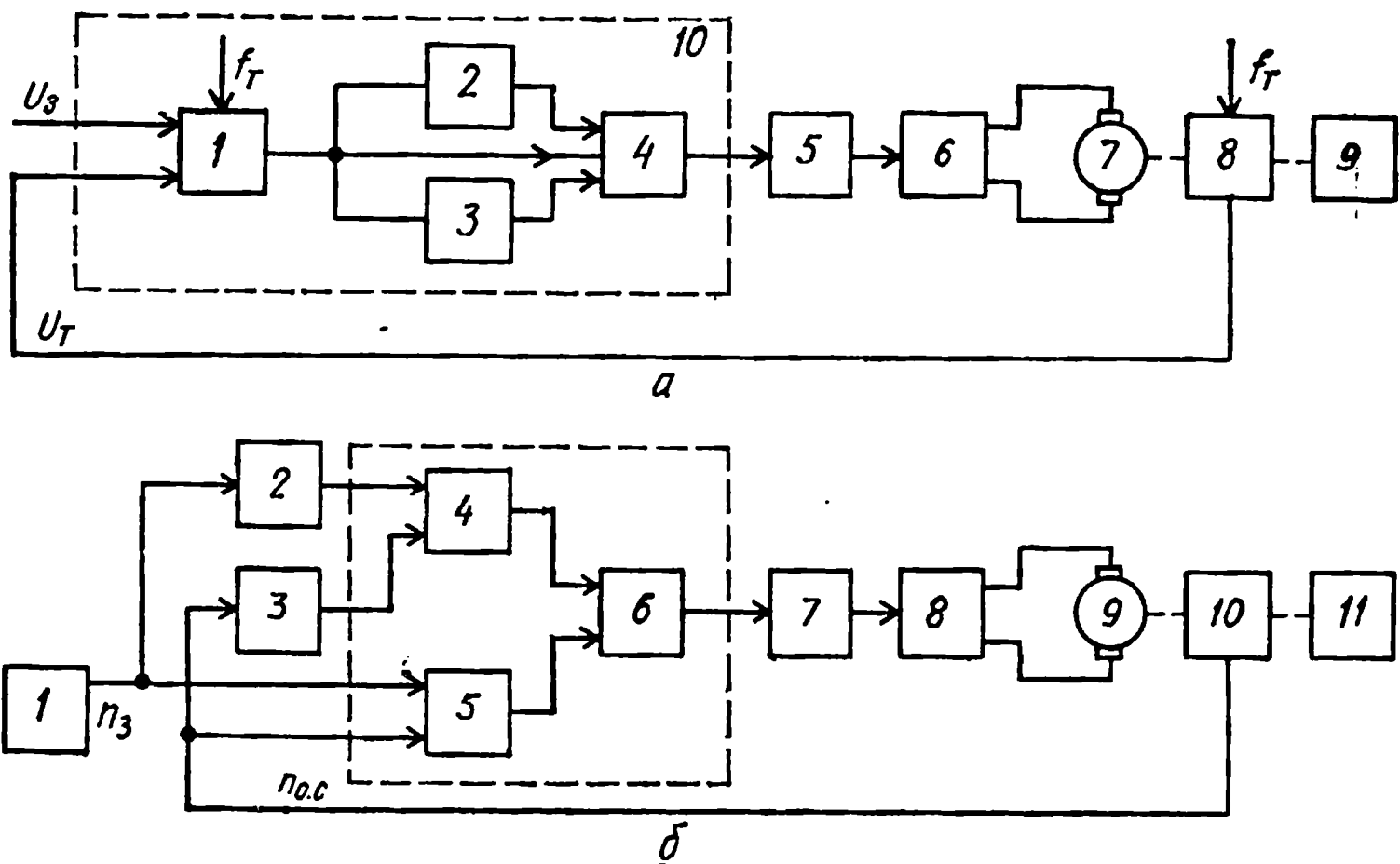


Рис. П.9. Функциональная схема привода с цифровым управлением:  
 а — с периодическим отсчетом; б — с непрерывным отсчетом

Управляющим сигналом для ШД является последовательность электрических импульсов (унитарный код). ШД непосредственно преобразует унитарный код в пропорциональный и фиксированный поворот выходного вала. Принципиальная схема управляемого привода с ШД (рис. П.8,а) содержит электронный коммутатор, собранный на микросхемах DD1—DD9. Он преобразует одноканальную последовательность импульсов в фазную систему импульсов, которые после усилителей мощности VT1—VT4 поступают в обмотки ШД. Реверсирование ШД осуществляется изменением чередования фаз импульсов тока в обмотках двигателя с помощью RS триггера DD3. На рис. П.8,б приведена таблица состояния элементов схемы при наличии управляющего сигнала в виде последовательности импульсов, а на рис. П.8,в — тока в обмотках ШД.

**Привод с цифровым управлением.** Широкое распространение при одновременном снижении стоимости микроЭВМ и микропроцессоров позволяет эффективно их использовать для управления электроприводом. По вариантам строения различают приводы с периодическим и непрерывным отсчетом величины рассогласования между заданным и фактическим значениями регулируемой величины [50].

При периодическом вычислительном процессе (рис. П.9,а) по сигналу  $f_T$  от тактового генератора периодически опрашивается цифровой датчик 8 углового положения вала двигателя 7. Цифровой код  $u_T$  текущего значения угла поворота вычитается из предыдущего значения, хранящегося в регистре и полученный результат делится на время такта. Затем полученное таким образом текущее значение скорости сравнивается с заданным значением  $U_3$  в цифровом сравнивающем устройстве 1 и результат подается на один из входов сумматора 4 и на входы цифрового интегратора 2, предназначенного для устранения статизма, и корректирующего устройства 3, повышающего устойчивость и качество регулирования. Цифровой код с выхода сумматора поступает в преобразователь «цифра — импульс» 5, управляющий транзисторным преобразователем 6, нагрузкой которого является якорь двигателя.

Недостатки рассмотренного варианта привода: его довольно сложная структура; необходимость представления задающего сигнала в цифровой форме; при этом датчик угла поворота представляет собой сравнительно сложный и дорогой прибор.

В приводе с непрерывным отсчетом (рис. П.9,б) реверсивный счетчик 5 непрерывно фиксирует разность между числом импульсов  $n_3$  от задающего генератора 1 с кварцевой стабилизацией частоты и числом импульсов  $n_{0.c}$  от



частотного датчика 10 обратной связи. В каждый текущий момент времени в реверсивном счетчике фиксируется число импульсов:

$$N = \int_0^t (n_z - n_{o.c}) dt.$$

С выхода счетчика сигнал  $N$  поступает на один из входов сумматора 6. На второй его вход поступает сигнал от корректирующего устройства 4, в котором вычисляются пропорциональная и дифференциальная составляющие сигнала. Цифровые сигналы для корректирующего устройства получают с помощью преобразователей «частота—код» 2 и 3. В остальном работа схемы аналогична работе схемы с периодическим отсчетом.

## 2. Однокоординатные системы копирования

Однокоординатные системы прямого копирования с независимым задающим движением (рис. П.10, а, б) имеют горизонтальное задающее движение с постоянной скоростью  $V_3 = \text{const}$ . Второе (вертикальное или наклонное) движение — копирующее; текущая скорость  $v_k$  этого движения определяется профилем шаблона и величиной  $V_3$ .

Если угол  $\beta$  между направлениями задающего и копирующего движения равен  $90^\circ$  (рис. П.10, а), то контурная скорость  $v_{\text{конт}}$ , т. е. скорость перемещения точки наплавки вдоль наплавляемого контура, определяется соотношением

$$v_{\text{конт}} = V_3 / \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол подъема профиля.

В системе копирования с углом  $\beta$  между направлениями задающего и копирующего движений, равным  $\beta = 90^\circ$ , наблюдаются значительные колебания

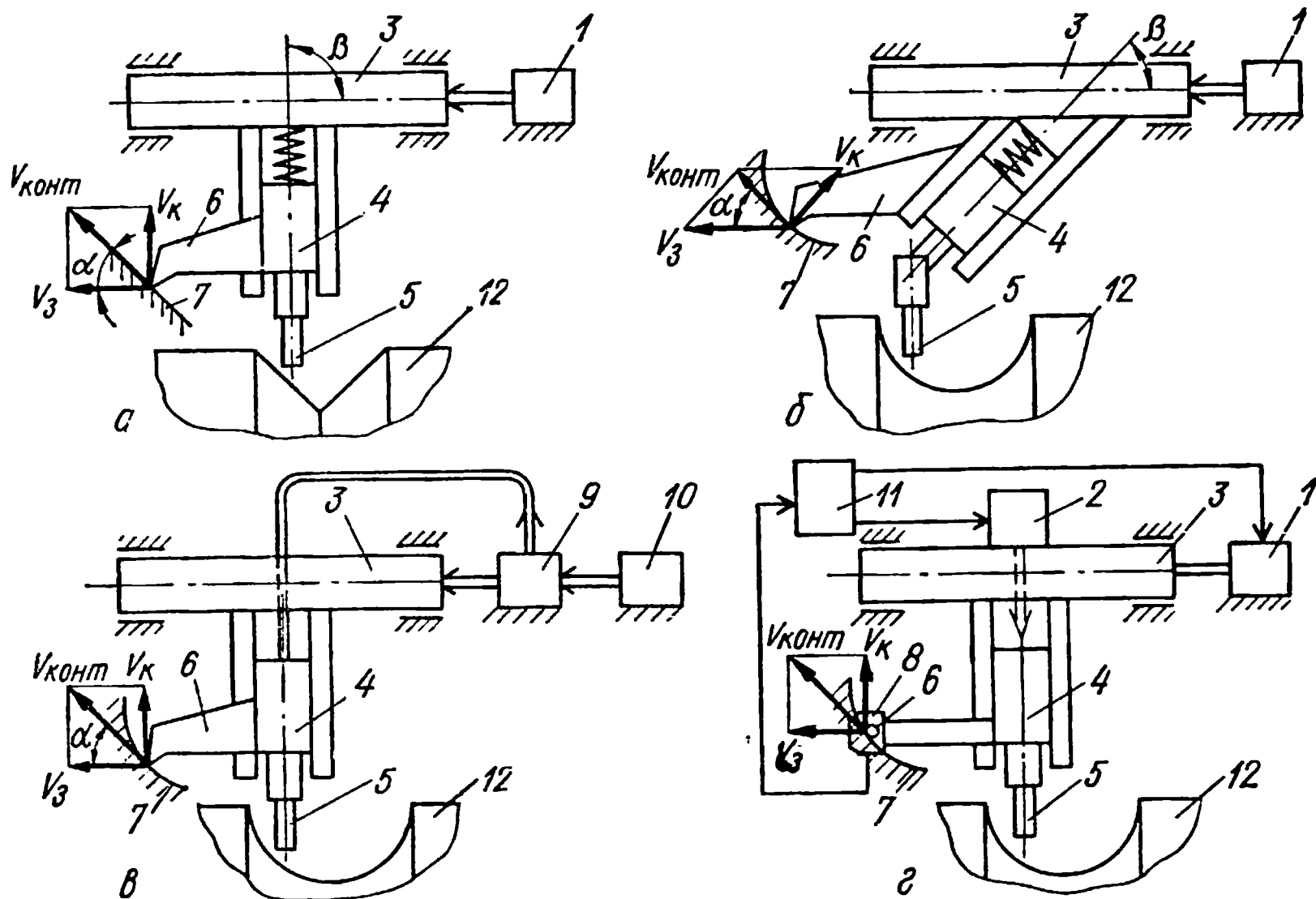


Рис. П.10. Схемы однокоординатных систем копирования шаблонов (применительно к наплавке ручьев прокатных валков):

а — прямого копирования с ортогональными суппортами; б — прямого копирования с неортогональными суппортами; в — прямого копирования с дифференциалом; г — непрямого копирования; 1 — привод горизонтального суппорта; 2 — привод вертикального суппорта; 3 — каретка горизонтального суппорта; 4 — каретка копирующего суппорта; 5 — наплавочная головка; 6 — щуп; 7 — шаблон; 8 — датчик; 9 — дифференциал; 10 — привод дифференциала; 11 — блок управления приводами; 12 — наплавляемое изделие

контурной скорости (при  $\alpha = 45^\circ$  увеличение контурной скорости составляет 41 %); кроме того, для этой системы ограничен предельный угол подъема профиля копира — практически  $\alpha < 50^\circ$ .

Более совершенной является система копирования с углом  $\beta < 90^\circ$ , например  $\beta = 45^\circ$  (рис. П.10,б). Нетрудно показать, что в этом случае контурная скорость определяется по формуле

$$v_{\text{конт}} = \frac{v_3 \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

и, например, для  $\beta = 45^\circ$ ,  $V_{\text{конт}}^{\text{min}} = 0,707V_3$  при  $\alpha = 45^\circ$  и  $V_{\text{конт}}^{\text{max}} = V_3$  при  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 90^\circ$ , т. е. колебание контурной скорости в пределах  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  составляет примерно 30 % (в сторону уменьшения). Недостаток системы — необходимость поворота направляющих следящего движения при переходе от копирования левой стороны шаблона к копированию его правой стороны.

Однокоординатные системы прямого копирования с зависимым задающим движением либо предусматривают управление скоростью задающего движения в зависимости от угла наклона копируемого контура к направлению задающего движения (в простейших случаях — ступенчатое изменение скорости по командам от путевых кулачков), либо содержат дифференциальный механизм для осуществления горизонтального и вертикального перемещений от одного привода. При использовании дифференциального механизма (рис. П.10,в) и вращении его входного вала с постоянной скоростью арифметическая сумма горизонтальной и вертикальной средних скоростей постоянна, т. е.

$$V_3 + V_k = \text{const} = V_{\text{пр}}$$

При отсутствии контакта щупа с шаблоном происходит движение по горизонтали, так как сопротивление движению вверх больше, чем в горизонтальном направлении. Таким образом, горизонтальное движение является задающим. Контурная скорость в этой системе зависит от величины угла наклона копируемого контура. При  $\beta = 90^\circ$

$$V_{\text{конт}} = \sqrt{V_3^2 + V_k^2}$$

и при  $\alpha = 45^\circ$  для средних значений скоростей  $V_3 = V_k = 0,5V_{\text{пр}}$  получаем

$$V_{\text{конт}} = \sqrt{(0,5V_{\text{пр}})^2 + (0,5V_{\text{пр}})^2} = 0,707V_{\text{пр}}$$

Таким образом,

$$V_{\text{конт}}^{\text{min}} = 0,707V_{\text{пр}}; \quad V_{\text{конт}}^{\text{max}} = V_{\text{пр}}$$

т. е. изменение контурной скорости составляет примерно 30 % (в сторону уменьшения). Систему этого типа можно применить для автоматизации наплавки профилей, у которых угол подъема постоянный либо близок к 0 ( $90^\circ$ ) с небольшим переходным участком («ящичные» калибры), а также во всех случаях, когда колебание скорости копирования в указанных пределах не имеет значения.

Однокоординатные системы непрямого копирования с независимым задающим движением так же, как и системы прямого копирования (рис. П.10,а,б), не обеспечивают постоянной контурной скорости.

Область применения копировальных систем с независимым задающим движением (непрямого и прямого действия) определяется допустимым увеличением скорости сварки, которое, в свою очередь, определяется допустимым уменьшением сечения шва на наклонных участках траектории движения. Поэтому наибольшее допустимое значение угла  $\alpha$  должно определяться из условия

$$\alpha = \arccos \frac{1}{\left(1 + \frac{|\Delta V_{\text{св}}|}{V_{\text{св}}}\right)},$$

где  $\Delta V_{\text{св}}$  — допускаемое увеличение скорости сварки на наклонных участках траектории. Так, при  $\frac{|\Delta V_{\text{св}}|}{V_{\text{св}}} = 0,1$  угол  $\alpha \leq 25^\circ$ .

Однокоординатные системы непрямого действия с зависимым задающим движением позволяют поддерживать практически постоянную контурную скорость путем управления скоростью задающего движения в зависимости от скорости копирующего движения. Поскольку положение в рабочей зоне участков траектории с различными углами  $\alpha$  известно, для управления скоростями могут использоваться также путевые кулачки.

Одной из простейших является система (рис. П.10,з), разработанная в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР применительно к наплавке ручьев прокатных валков. Копирующее устройство (датчик) системы содержит один двухпозиционный переключатель, который срабатывает при соприкосновении копирующего пальца (щупа) с шаблоном и отключается при отходе щупа от шаблона. При отключении двухпозиционного переключателя включается горизонтальное движение на шаблон, а при включении его отключается горизонтальное движение и включается вертикальное. Направление горизонтальной подачи устанавливается тумблером на пульте управления в зависимости от того, какая сторона ручья наплавляется. При постоянных скоростях горизонтальной и вертикальной подачи скорость копирования в такой системе определяют по формуле (без учета времени переключений):

$$v_{\text{конт}} = V_3 / \left( \frac{V_3}{V_k} \sin \alpha + \cos \alpha \right).$$

Каждый привод (горизонтального и вертикального перемещения соответственно) имеет по три различные скорости. Чтобы обеспечить с некоторым приближением постоянную скорость копирования или ее изменение по заданному закону в зависимости от угла  $\alpha$  подъема профиля, необходимо соответственно переключить скорости  $V_3$  и  $V_k$  в заранее выбранных точках переставными путевыми кулачками, установленными на суппортах вертикального и (или) горизонтального перемещения и воздействующими на микропереключатели. Одновременно с переключением скоростей подается команда на наклон оси электрода вокруг точки наплавки на  $15^\circ$  относительно предыдущего положения. Направление наклона электрода устанавливается тем же тумблером, что и направление горизонтальной подачи. С увеличением диаметра вала в точке наплавки скорость вращения вала автоматически уменьшается благодаря кинематической связи вертикального суппорта с потенциометром, задающим частоту вращения шпинделя вращателя.

Системы с зависимым задающим движением обеспечивают автоматическое копирование с постоянной скоростью в пределах одного квадранта (например от  $0$  до  $90^\circ$ ). При переходе к другому квадранту необходимы дополнительные переключения: для изменения направления задающего движения или функций координат (когда задающее движение становится копирующим, а копирующее — задающим).

### 3. Блок программного управления полуавтоматом для дуговой сварки

Схема блока (рис. П.11) обеспечивает управление сваркой длинных, коротких швов и сваркой точками в соответствии с циклограммами, приведенными на рис. 2.11.

Логическая часть схемы собрана на интегральных микросхемах серии К511 (схемы *DD1*, *DD2*, *DD3*). В качестве ключей, осуществляющих коммутацию электромагнита клапана газоотсекателя *У* и реле источника сварочного тока *К1*, используются тиристоры *VS1*, *VS2*, включение которых производится транзисторами *VT1*, *VT2*. Режимы сварки «длинный шов», «короткий шов», «сварка точками» задаются переключателем *S1* и резистором *R10*. В качестве управляемого привода подачи электродной проволоки УПП используется привод, описанный в прил. 1 (см. рис. П.4). Источник питания элементов схемы на рис. П.11 не показан.

В режиме сварки «длинных швов» (кнопка *S1* отпущена) схема работает следующим образом. Положительный сигнал через кнопку «пуск», расположенную на держателе горелки, переключает триггер *ТТ* (*DD1.2*) и последний запоминает это состояние. Сигнал с выхода *Q* триггера (логическая единица) через схему совпадения *DD3.1* включает привод и через инверторы *DD2.1*,

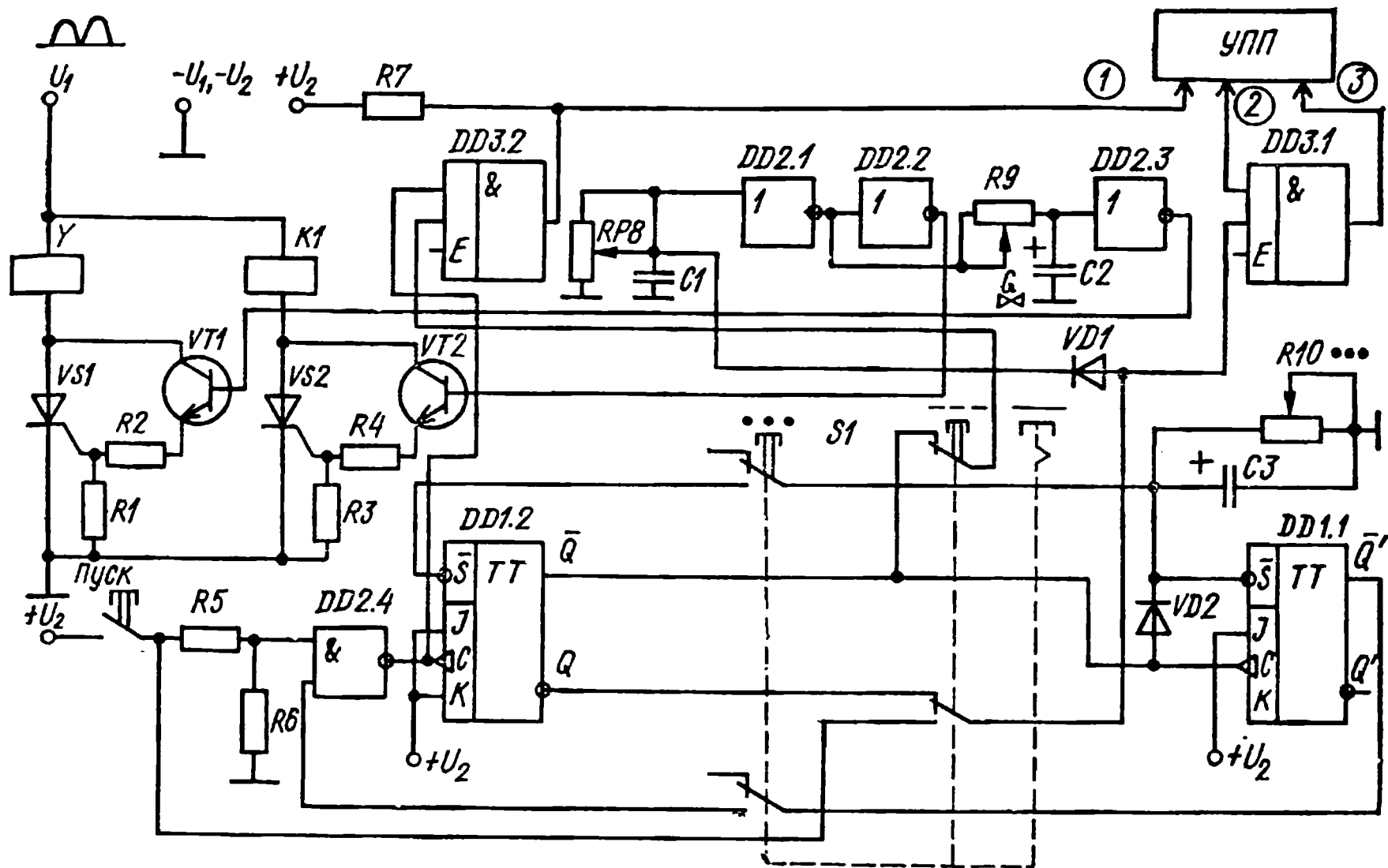


Рис. П.11. Упрощенная схема блока программного управления сварочным полуавтоматом: УПП — управляемый привод подачи электродной проволоки; 1, 2, 3 — цепи подачи сигналов соответственно динамического торможения, токовой защиты, включения привода; — — — — сварка длинных швов; - - - - сварка коротких швов; ... — сварка точками

DD2.2, DD2.3 и транзисторы VT1, VT2 включает тиристоры VS1, VS2, в анодной цепи которых включены обмотки электромагнита клапана газоотсекателя У и реле источника питания К1.

Элемент DD3.2 подготавливает цепь динамического торможения. На один из входов DD3.2 поступает логический нуль с выхода инвертора DD2.4, а на другой через переключатель S1 — логический нуль с Q выхода триггера DD1.2. Сигнал динамического торможения на выходе элемента DD3.2 отсутствует. При возврате кнопки «пуск» в исходное состояние описанное состояние схемы сохраняется, так как триггер DD1.2 включен.

При повторном однократном нажатии кнопки «пуск» триггер DD1.2 переключается в исходное состояние. Сигнал на выходе Q этого триггера становится равным нулю, открывается выходной транзистор элемента DD3.1 и привод отключается. На оба входа элемента DD3.2 поступает сигнал логической единицы и поэтому его выход включает цепь динамического торможения привода. Конденсатор C1 начинает разряжаться на резистор R8. При снижении напряжения на C1 до порога срабатывания элемента DD2.1 сигнал на выходе этого элемента станет равным единице, а на выводе элемента DD2.2 — нулю. Тиристор VS2 отключается, размыкается цепь питания реле К1 и происходит отклонение источника сварочного тока. Через резистор R9 начинает заряжаться конденсатор C2 и при достижении напряжения на нем порога срабатывания инвертора DD2.3 на его выходе появится логический нуль, тиристор VS1 закрывается, клапан газоотсекателя прекращает подачу защитного газа. Схема подготовлена к повторному пуску.

При включенной кнопке «сварка точками» рабочее состояние схемы определяется длительностью разряда конденсатора C3 через резистор R10. При этом на выходе Q обоих триггеров (основного DD1.2 и вспомогательного DD1.1) появится логический нуль и они вернутся в исходное состояние. За время сварки точки любые манипуляции с кнопкой «пуск» не меняют состояния схемы, так как на втором входе инвертора DD2.4 присутствует запрещающий (нулевой) сигнал с Q выхода триггера DD1.1.

При сварке «короткими» швами продолжительность сварки определяется длительностью включения кнопки «пуск». При ее отпускании схема возвращается в исходное состояние. При этом триггеры DD1 в работе схемы не участвуют.

#### 4. Функциональная схема универсальной системы управления на основе микропроцессорного устройства

Рассмотрим назначение устройств схемы, показанной на рис. П.12:

**МПУ** — микропроцессорное устройство, производящее арифметические и логические операции и содержащее оперативное (**ОЗУ**) и постоянное (**ПЗУ**) запоминающие устройства;

**ВТ** — видеотерминал, на экране которого высвечиваются диагностические сообщения о ходе процесса сварки и работе оборудования;

**ЦП** — центральный пульт управления и программирования;

**ЭПП ЗУ** — энергонезависимое перепрограммируемое **ПЗУ**. В **ЭПП ЗУ** в виде двоичного кода записаны программный цикл и режимы сварки. Таких программ может быть записано несколько. При исчезновении питания энергонезависимое **ПП ЗУ** сохраняет записанную в нем информацию;

**НМЛ** — кассетный накопитель на магнитной ленте. Программы, записанные в **ЭПП ЗУ**, могут быть введены на магнитную ленту либо с магнитной ленты введены в **ЭПП ЗУ**. Имея **НМЛ**, можно собирать банк проверенных и отлаженных программ, производить их тиражирование и обмен с другими пользователями аналогичной аппаратуры;

**ЦАП** — цифроаналоговый преобразователь цифровых величин, выдаваемых **МПУ**, в аналоговый сигнал, который является задающей установкой для локальных регуляторов;

**АЦП** — аналого-цифровой преобразователь. Производит преобразование аналоговой информации о параметрах сварочного процесса в цифровую форму, которая используется **МПУ** для контроля за ходом сварочного процесса, диагностических сообщений и для сбора данных;

**МП** — местный пульт, с помощью которого осуществляются установочные перемещения механизмов сварочного оборудования в наладочном режиме и корректировка параметров сварки в полуавтоматическом режиме. На местный пульт поступает сигнальная информация о состоянии сварочного процесса;

**Д** — дискретные датчики (конечные выключатели);

**ИМ** — исполнительные механизмы и аппаратура дискретного действия (клапан газоотсекателя, осциллятор и др.);

**УВ/ВЫВ** — устройство ввода/вывода дискретных сигналов, осуществляет потенциальную развязку и согласование по напряжению, роду тока и мощности дискретных элементов **МП**, **Д** и **ИМ**.

Система управления содержит группу локальных автоматических регуляторов:

**РНД** — регулятор напряжения дуги;

**УПП** — управляемый привод подачи присадочной проволоки;

**УПКр** — управляемый привод каретки;

**УПК** — управляемый привод механизма поперечных колебаний электрода (сварочной горелки);

**I** — источник сварочного тока.

По команде «пуск сварки» **МПУ** начинает периодически опрашивать **ЭПП ЗУ**, состояние **УВ/ВЫВ**, **ЦАП** и **АЦП**.

Через **УВ/ВЫВ** начинается выполнение основной программно-логический цикл включения механизмов и аппаратуры оборудования. Последовательность включения и временные интервалы определяются программой, которая записана в **ЭПП ЗУ**, и состоянием командных органов на **ЦП**, **МП** и датчиков, расположенных на объекте управления. Наряду с основной программой логического управления выполняется подпрограмма задания уставок локальным автоматическим регуляторам. Во время сварки система собирает данные о процессе и выдает их на зна-

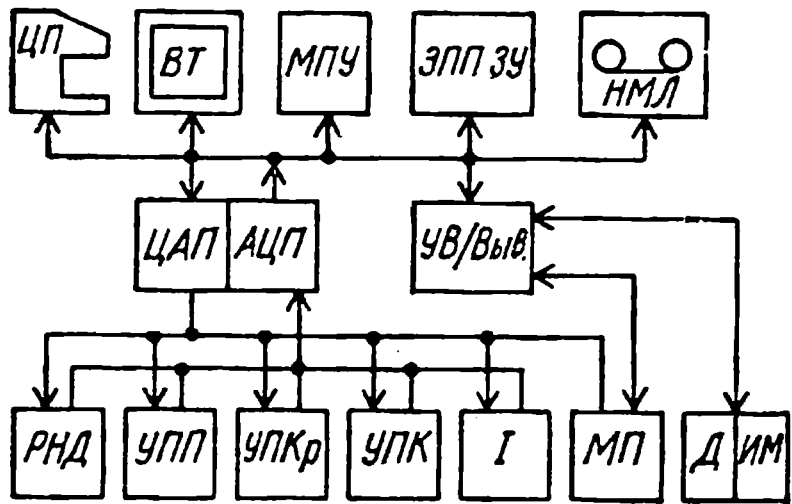


Рис. П.12. Функциональная схема управления установкой для сварки неплавящимся электродом с программированием цикла и параметров режима сварки



косинтезирующее печатающее устройство (на рис. П.12 не показано), которое может быть совмещено с ЦП — в результате пользователь получает сертификат на сварной шов.

### 5. Определение передаточной функции системы саморегулирования дуги с плавящимся электродом

Методику определения передаточной функции между регулируемой величиной ( $H, b, i_d, u_d$ ) и каким-либо возмущением (см. табл. 2.3) рассмотрим на примере определения такой функции между шириной шва и возмущением по напряжению сети, т. е.

$$W(s)_{\tilde{u}'_c b} = \frac{b(s)}{u'_c(s)}, \quad (1)$$

где  $s$  — оператор.

Поскольку исходная структурная схема (см. рис. 2.17) достаточно громоздка для непосредственного ее использования с целью вычисления передаточной функции, необходимо осуществить ее последовательные эквивалентные преобразования. Для этого исключаются из рассмотрения все возмущения, кроме  $\tilde{u}'_c$ , и исходная система изображается таким образом, чтобы точка приложения возмущения  $b$  была входом схемы, а возмущаемая величина  $b$  — выходом (рис. П.13, а).

Звено с передаточной функцией  $W_V$  переносится через звено  $W_I$  вправо и отображается эквивалентной передаточной функцией  $W'_V = W_V W_I$  (изображено штриховой линией).

Соединенные последовательно звенья VI и VII, а также IV и I заменяются эквивалентными звеньями с передаточными функциями  $W_{VI-VIII} = W_{VI} W_{VII}$  и  $W_{IV-I} = W_{IV} W_I$  (рис. П.13, б). После изображения звена  $W'_V$  в виде местной обратной связи, охватывающей звено  $W_{II}$ , структурная схема примет вид, показанный на рис. П.13, в.

После представления  $W_{II}$  и  $W'_V$  звеном

$$W_{II-V'} = \frac{W_{II}}{1 + W_{II} W'_V}$$

определяется передаточная функция замкнутого контура

$$W_{III-V'} = \frac{W_{III-VIII} W_{II-V'}}{1 + W_{III-VIII} W_{II-V'}}. \quad (2)$$

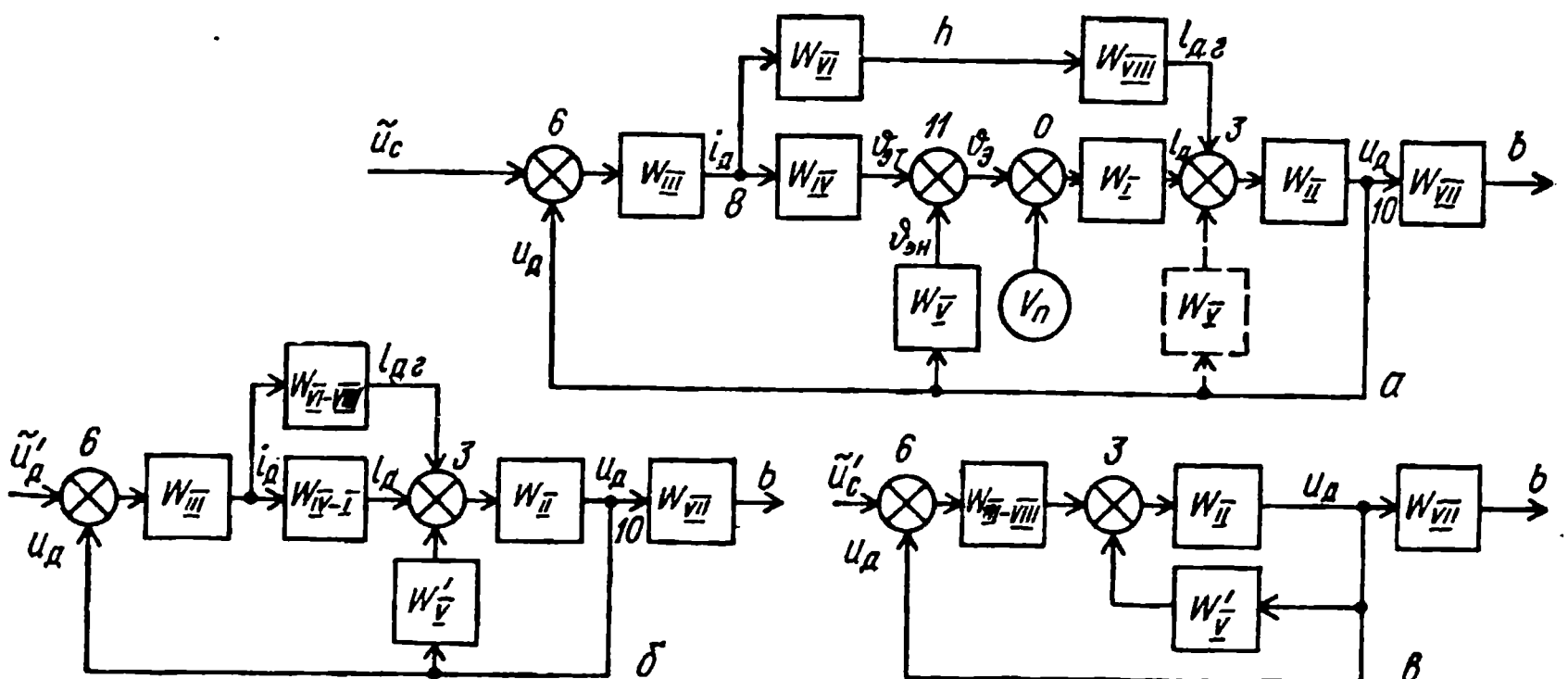


Рис. П.13. Эквивалентные преобразования структурной схемы процесса саморегулирования дуги

В передаточных функциях  $W_{II-V}$  и  $W_{III-V}$  знак « $\pm$ » указывает, что местная и главная обратные связи отрицательны.

Действительно, в  $W_V$  входит коэффициент  $k_2 < 0$ , а главная обратная связь всегда отрицательна для устойчивых систем.

В окончательной записи передаточная функция примет вид

$$W(s)_{\tilde{u}'_c, b} = \frac{b(s)}{\tilde{u}'_c(s)} = W_{III-V} \cdot W_{VII}. \quad (3)$$

После подстановки в (3) передаточных функций из схемы рис. П.13 и преобразований окончательно получим

$$W(s)_{\tilde{u}'_c, b} = \frac{-kk_{ш}}{(\tau_{ш}s + 1)\{[(\tau_3s + 1)s - k_2E](\tau_{н}s + 1)(\tau_{г}s + 1) - k\}}, \quad (4)$$

где  $k = \frac{k_1 k_{г} k_{дг} E}{R_{н}}$ .

Из (4) следует, что рассматриваемая система имеет характеристическое уравнение 5-го порядка.

Переходной процесс в системе детально можно изучить на основе применения известных методов теории автоматического регулирования.

Наибольший практический интерес представляет определение статической ошибки в системе по окончании переходного процесса, т. е. при  $s = 0$ :

$$\Delta b = [W_{\tilde{u}'_c, b}]_{s=0} \Delta \tilde{u}'_c; \quad (5)$$

$$\Delta b = \frac{kk_{ш}}{k_2E + k}. \quad (6)$$

С учетом (5)

$$\Delta b = \frac{k_1 k_{г} k_{дг} k_{ш}}{k_2 R_{н} + k_1 k_{г} k_{дг}} \Delta \tilde{u}'_c. \quad (7)$$

Статический коэффициент передачи (м/В)

$$k_c = \frac{k_1 k_{г} k_{дг} k_{ш}}{k_2 R_{н} + k_1 k_{г} k_{дг}}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что в тех случаях, когда статическая характеристика устойчивой работы близка к вертикальной ( $k_2 \approx 0$ ),  $k_c \approx k_{ш}$ .

## 6. Стабилизация сварочного тока в выпрямителе ВДУ-504

Упрощенная схема управления сварочным выпрямителем ВДУ-504, обеспечивающая формирование крутопадающей характеристики, показана на рис. П.14. Собственно силовой тиристорный выпрямитель СТВ построен по шестифазной схеме с уравнительным реактором. Управление тиристорами  $VS1 - VS6$  осуществляется по вертикальному принципу. Блок управления тиристорами БУ состоит из шести стандартных элементов «Логика» типа М-403. Элемент М-403 представляет собой транзисторный усилитель постоянного тока с инверсным выходом. При подаче на вход усилителя синусоидального напряжения на выходе формируются прямоугольные импульсы, используемые для управления тиристорами выпрямительного блока. Падающая внешняя характеристика формируется за счет введения обратной связи по току дуги. В качестве измерительного преобразователя сигнала обратной связи использован магнитный усилитель МУ, содержащий в качестве намагничивающей обмотки шину, по которой протекает сварочный ток. Рабочие обмотки МУ соединены встречно-параллельно и питаются от сети через трансформатор ТЗ.

Напряжение сигнала обратной связи, пропорциональное току дуги, после выпрямителя В1 и фильтрации (R1 - C) сравнивается в П-образной схеме срав-

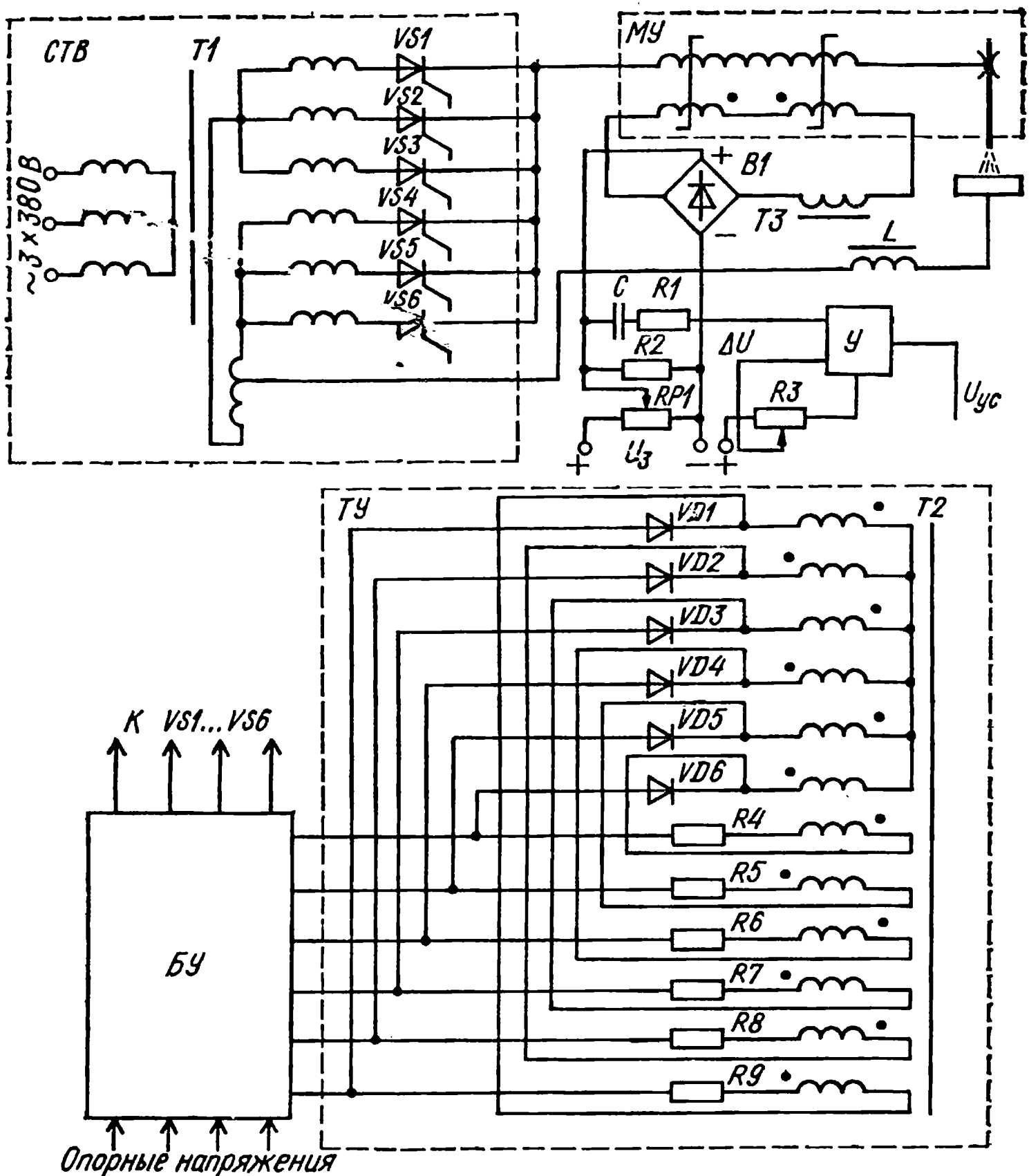


Рис. П.14. Схема стабилизации сварочного тока в выпрямителе ВДУ-504

нения ( $R2, RP1$ ) с эталонным сигналом  $U_3$ . Разностный сигнал  $\Delta u$  поступает на вход транзисторного усилителя  $U$  с регулируемым коэффициентом усиления (резистор  $R4$ ). Усиленный сигнал  $u_{yc}$  подается в шестифазный трансформаторный усилитель  $TU$ , образованный трансформатором  $T2$ , диодами  $VD1—VD6$  и резисторами  $R4—R9$ . После  $TU$  сигнал управления разветвляется на входы шести усилителей М-403 блока управления  $БУ$ . Глубина обратной связи по току устанавливается резистором  $R3$ ; с увеличением сигнала обратной связи внешняя характеристика источника питания становится более крутой, приближаясь к вертикальной. При этом сварочный ток практически не зависит от возмущений по напряжению сети и длины дуги. Для получения жестких внешних характеристик элемент сравнения переключают с выпрямителя  $B1$  на резисторный делитель напряжения, подключенный к дуге (на схеме не показан). В остальном работа схемы управления тиристорами остается без изменений. В зависимости от величины коэффициента обратной связи по напряжению дуги можно получить возрастающую, жесткую и пологопадающую внешние характеристики.

При жесткой характеристике выпрямитель можно рассматривать как стабилизированный источник питания, выходное напряжение которого не зависит от колебаний напряжения сети. Одновременное введение обратных связей по току и напряжению в сочетании с изменениями знака этих связей значительно расширяет диапазон регулирования угла наклона внешних характеристик.

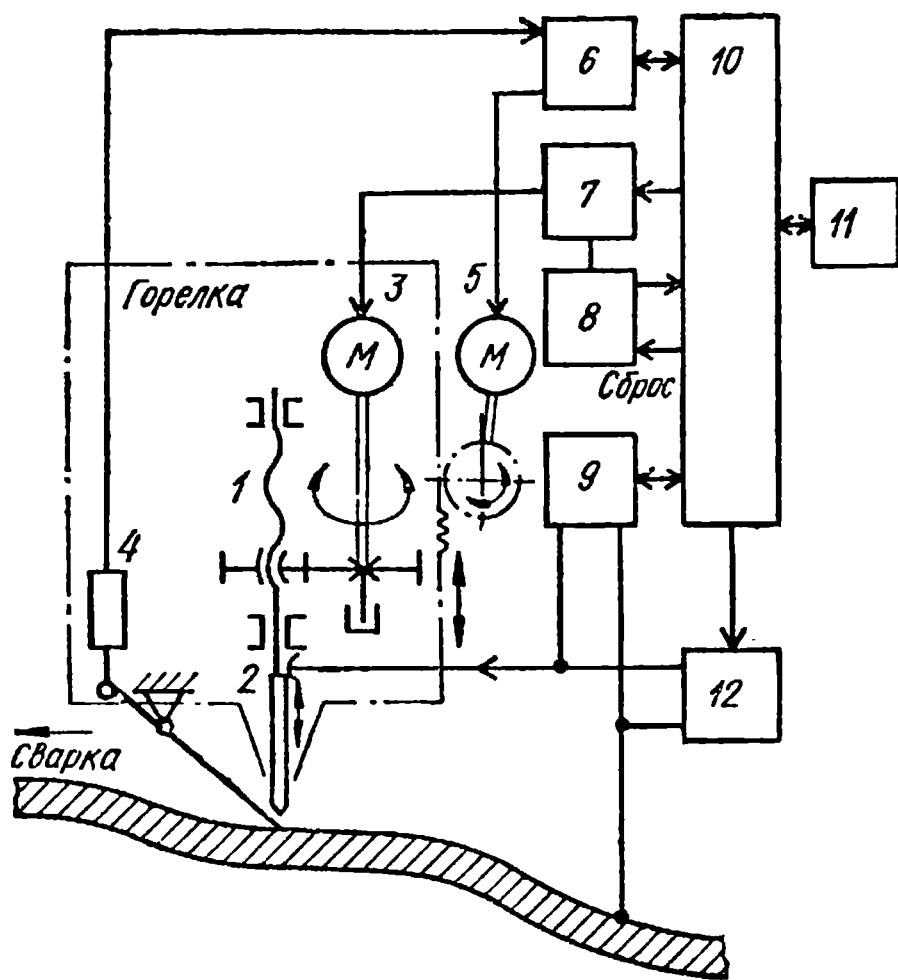


Рис. П.15. Функциональная схема системы АРНД при сварке неплавящимся электродом

металл» и исполнительный двигатель 5 приближает горелку к поверхности свариваемого изделия. Щуп датчика 4 системы отслеживания касается изделия и на выходе чувствительного элемента датчика формируется сигнал. В блоке 6 происходит сравнение величины сигнала датчика 4 с заданным. Как только торец сопла приблизится к изделию на заданное расстояние, двигатель 5 останавливается и блок 6 выдает сигнал окончания процесса поиска. По этому сигналу устройство управления включает источник сварочного тока 12 на минимальное напряжение, не вызывающее плавления основного металла, и включает на малую скорость вращения блок управления 7 шаговым двигателем 3. Электрод посредством винтовой передачи 1 опускается вниз до касания металла. Напряжение на участке «электрод — металл» становится равным нулю, что приводит к срабатыванию блока регулирования 9. По сигналу блока 9 устройство управления 10 формирует сигнал сброса счетчика 8. Включается на режим сварки источник сварочного тока 12 и производится отвод электрода от изделия. При этом возбуждается дуга, после чего, поддерживая с помощью регулятора 9 постоянным напряжение дуги, двигатель 3 начинает погружение электрода 2 на заданную глубину. Контроль погружения осуществляется счетчиком 8. Алгоритм управления позволяет включать начало движения в направлении сварки в процессе погружения или после погружения конца электрода в ванну, на заданную глубину. В дальнейшем в процессе сварки система стабилизации расстояния «сопло — металл», образованная контуром 4-6-5-4, и система регулирования напряжения на участке «электрод — металл», образованная контуром 9-10-7-3-2-12-10, функционируют автоматически.

## 8. Устройство и принцип действия тепловизора

Перспективным средством измерения температурных полей являются инфракрасные сканирующие пирометры — тепловизоры, приемная часть одного из образцов которых изображена на рис. П.16. Приемником 9 излучения служит фотодиод на основе InSb, помещенный в резервуар 7 с жидким азотом для охлаждения. Оптическая система, осуществляющая кадровую и строчную развертку, состоит из сферического зеркала 12, колеблющегося отражателя 1 и вращающейся германиевой шестигранной призмы 13, электродвигателей 3 и 5, кулачка 2, входящих в состав привода сканирующей оптической системы. Блоки 4 и 6 — фотопреобразователи, применены для формирования сигналов кадровой и строчной развертки на видеоконтрольное устройство или устройство магнитной записи. Германиевые линзы 11 и зеркало 10 осуществляют фокусировку

## 7. Система АРНД при сварке неплавящимся электродом с регулированием величины его погружения в металл и стабилизацией расстояния «сопло-металл»

На рис. П.15 показана функциональная схема системы, выполненная с применением двух автономных электроприводов 3 и 5. Систему можно использовать для сварки изделий переменной толщины или с изменяющейся кривизной поверхности; она одновременно обеспечивает стационарность движения потока защитного газа (путем стабилизации расстояния «сопло-металл») и постоянство напряжения (длины) дуги (посредством регулирования расстояния «электрод—металл»).

При получении с пульта 11 команды «пуск» устройство управления 10 включает блок управления 6 системы стабилизации расстояния «сопло —

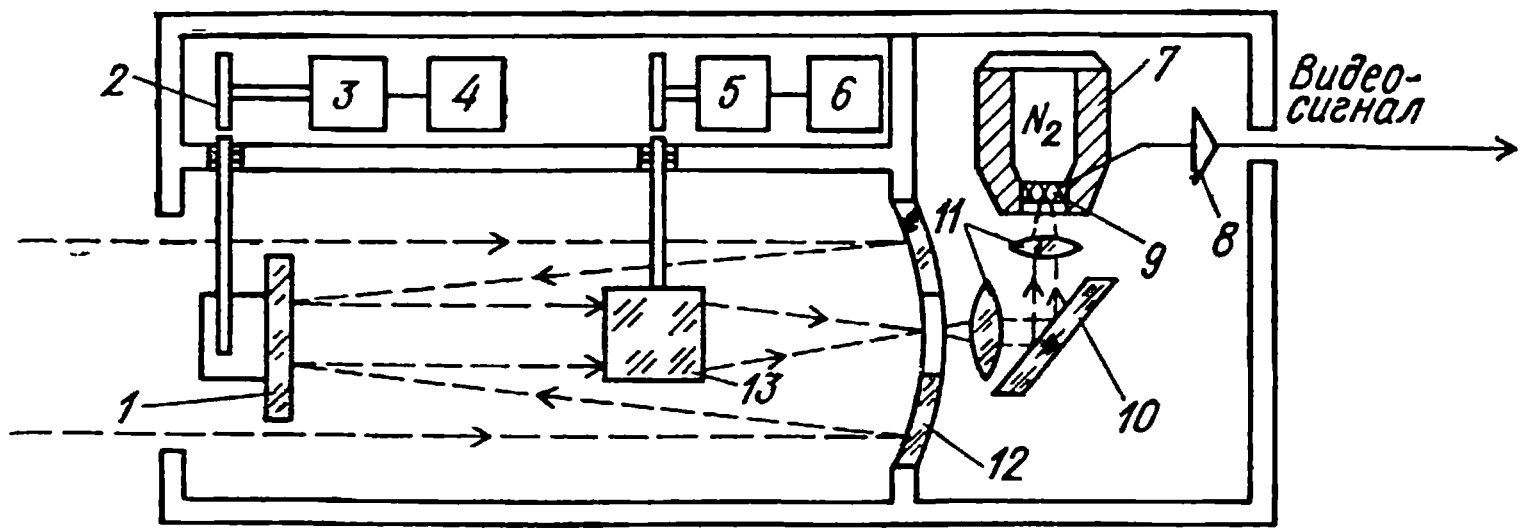


Рис. П.16. Устройство тепловизора

сканирующего по изображению луча на приемник 9 излучения; 8 — предварительный видеоусилитель.

При измерении температуры в непосредственной близости от точки сварки возникают помехи, связанные с изучением электрической дуги. Поэтому необходимо решать задачу о выделении полезного сигнала из фона, создаваемого шумами. Поскольку длины волн излучения дуги смещены в ультрафиолетовую область спектра и измерение ведется преимущественно в инфракрасном диапазоне, можно достаточно точно определять температуру вблизи от дуги, применяя специальные фильтры.

### 9. Определение погрешности положения шва относительно линии стыка свариваемых кромок

При использовании для отсчета положения изделия стыка свариваемых кромок максимальное значение общей погрешности положения шва можно определить по формуле

$$\Delta_{\text{ст}} = \Delta_{\text{э}} + \Delta_{\text{к}} + \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{с.п.с}} + \Delta_{\text{д.п.с}}, \quad (9)$$

где  $\Delta_{\text{э}}$  — составляющая общей погрешности, обусловленная неточным размещением шва, например, из-за деформации электродной проволоки;  $\Delta_{\text{к}}$  — составляющая общей погрешности, обусловленная тем, что датчик и электрод разнесены вдоль шва на расстояние  $l_y$ , мм, а сам стык характеризуется смещением  $k_y$ , мм/м;  $\Delta_{\text{д}}$  — составляющая общей погрешности, обусловленная неточным измерением положения стыка датчиком, возникающая вследствие изменения физического состояния кромок стыка, изменения температурных условий, влияния различных помех и т. п.;  $\Delta_{\text{с.п.с}}$  — составляющая общей погрешности, обусловленная наличием статической погрешности следящей системы;  $\Delta_{\text{д.п.с}}$  — составляющая общей погрешности, обусловленная наличием динамической погрешности следящей системы.

Значение погрешности  $\Delta_{\text{э}}$  расчету практически не поддается; его стремятся свести к приемлемому значению с помощью мер конструктивного характера, например: правкой электродной проволоки перед подачей ее в зону сварки; применением в сварочных аппаратах мундштуков из износостойких материалов; уменьшением величины вылета электродной проволоки и т. п. Значение погрешности  $\Delta_{\text{э}}$  в среднем составляет 0,1—0,4 мм.

Погрешность  $\Delta_{\text{к}}$  при плоскопараллельном перемещении сварочного инструмента и датчика относительно стыка можно определить из выражения

$$\Delta_{\text{к}} = (k_y l_y) / 1000 \quad (10)$$

или по номограмме (рис. П.17).

Погрешность  $\Delta_{\text{д}}$  — суммарная величина максимальной погрешности датчика. Отдельные составляющие ее и суммарная величина могут быть рассчитаны аналитически или определены экспериментально.



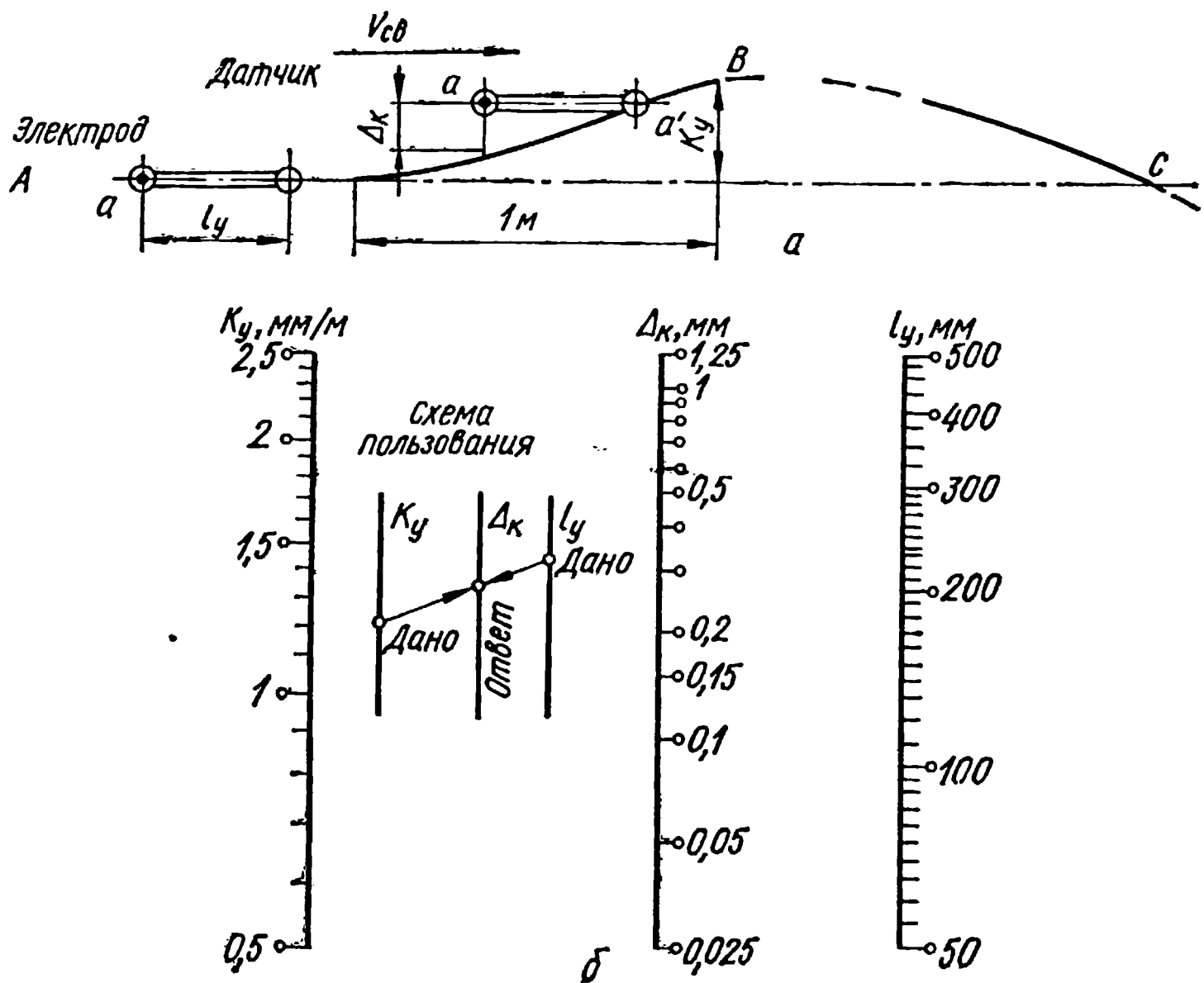


Рис. П.17. Определение погрешности  $\Delta_k$ ;

*a* — образование погрешности  $\Delta_k$  (*ABC* — стык свариваемых кромок); *б* — номограмма для определения  $\Delta_k$

Погрешности  $\Delta_{с.п.с}$  и  $\Delta_{д.п.с}$  — характеристики качества работы следящей системы.

Расчитанная по формуле (9) погрешность положения шва определяет максимально возможное ее значение. Входящие в (9) составляющие можно рассматривать как случайные и независимые величины и, следовательно, погрешность системы можно определять геометрическим суммированием ее составляющих с обязательным указанием вероятности полученного значения.

При использовании для измерения положения сварочной горелки кромки изделия максимальное значение общей погрешности положения шва можно найти по формуле

$$\Delta_{кр} = \Delta_{э} + \Delta_k + \Delta_з + \Delta_d + \Delta_{с.п.с} + \Delta_{д.п.с}, \quad (11)$$

где  $\Delta_з$  — составляющая общей погрешности, обусловленная изменениями зазора в стыке в процессе сварки.

Погрешность

$$\Delta_з = t_{\max} - t_{\min}/2, \quad (12)$$

где  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  — максимальный и минимальный зазор в стыке.

Эту погрешность можно уменьшить вдвое, если при настройке системы искусственно сместить горелку (электрод) на  $0,5 \Delta_з$  в направлении увеличения зазора в стыке.

Составляющая общей погрешности  $\Delta_k$  может быть равна нулю, если электрод и датчик были расположены на одном перпендикуляре к свариваемому шву, т. е. при измерении сбоку от точки сварки.

Если для ориентирования датчика системы используется копирная линия, нанесенная на постоянном расстоянии  $l_k$  от одной из свариваемых кромок, и при этом сварочный инструмент и датчик расположены на одном перпендикуляре

к свариваемому стыку, то максимальное значение общей погрешности размещения шва можно определить по формуле

$$\Delta_{к.л} = \Delta_{э} + \Delta_{л} + \Delta_{з} + \Delta_{д} + \Delta_{с.п.с} + \Delta_{д.п.с}, \quad (13)$$

где  $\Delta_{л}$  — погрешность, возникающая из-за неточного выдерживания расстояния  $l_k$  и ширины копирной линии, а также от случайных изменений ее контрастности относительно остальной поверхности изделия.

#### 10. Электромеханические датчики систем автоматического направления сварочной горелки по стыку

Раньше других появились электромеханические датчики с электроконтактными и бесконтактными путевыми переключателями. Основной недостаток электроконтактных преобразователей — ограниченный ресурс, связанный с усталостными разрушениями пружинных устройств переключателей и эрозией контактов.

В последние годы широко распространены электромеханические датчики, позволяющие наводить сварочный инструмент на линию соединения и поддерживать заданное расстояние до поверхности изделия, т. е. измерять отклонения места стыка в двух направлениях. Эти датчики устанавливают под углом  $30—45^\circ$  к линии соединения свариваемых элементов (рис. П.18).

Щуп электромеханического датчика прижимается к поверхностям изделия с небольшой силой от 1 до 10 Н в отличие от устройств прямого действия, где сила прижима щупа определяется в основном массой перемещаемых частей и может достигать сотен ньютонов. С увеличением силы прижима щупа электромеханического датчика к изделию возрастают вибрации сварочного автомата или конструкции, увеличивается износ щупа и затрудняется сварка концевой участка шва после выхода щупа из контакта с изделием, так как при этом манипуляционная система и базовые элементы разгружаются от усилия со стороны щупа и из-за их конечной жесткости сварочная горелка смещается в направлении действия реакции изделия.

Для задач, требующих более высокой точности, разрабатываются электромеханические датчики с преобразователями, имеющими линейный выход во всем диапазоне измерения или на его части. В качестве преобразователей такого типа могут применяться резисторные преобразователи в виде потенциометров. Другой вид резисторных преобразователей — угольные реостаты, представляющие собой наборы (столбы) из угольных шайб. При изменении силы сжатия набора его общее электрическое сопротивление изменяется за счет изменения

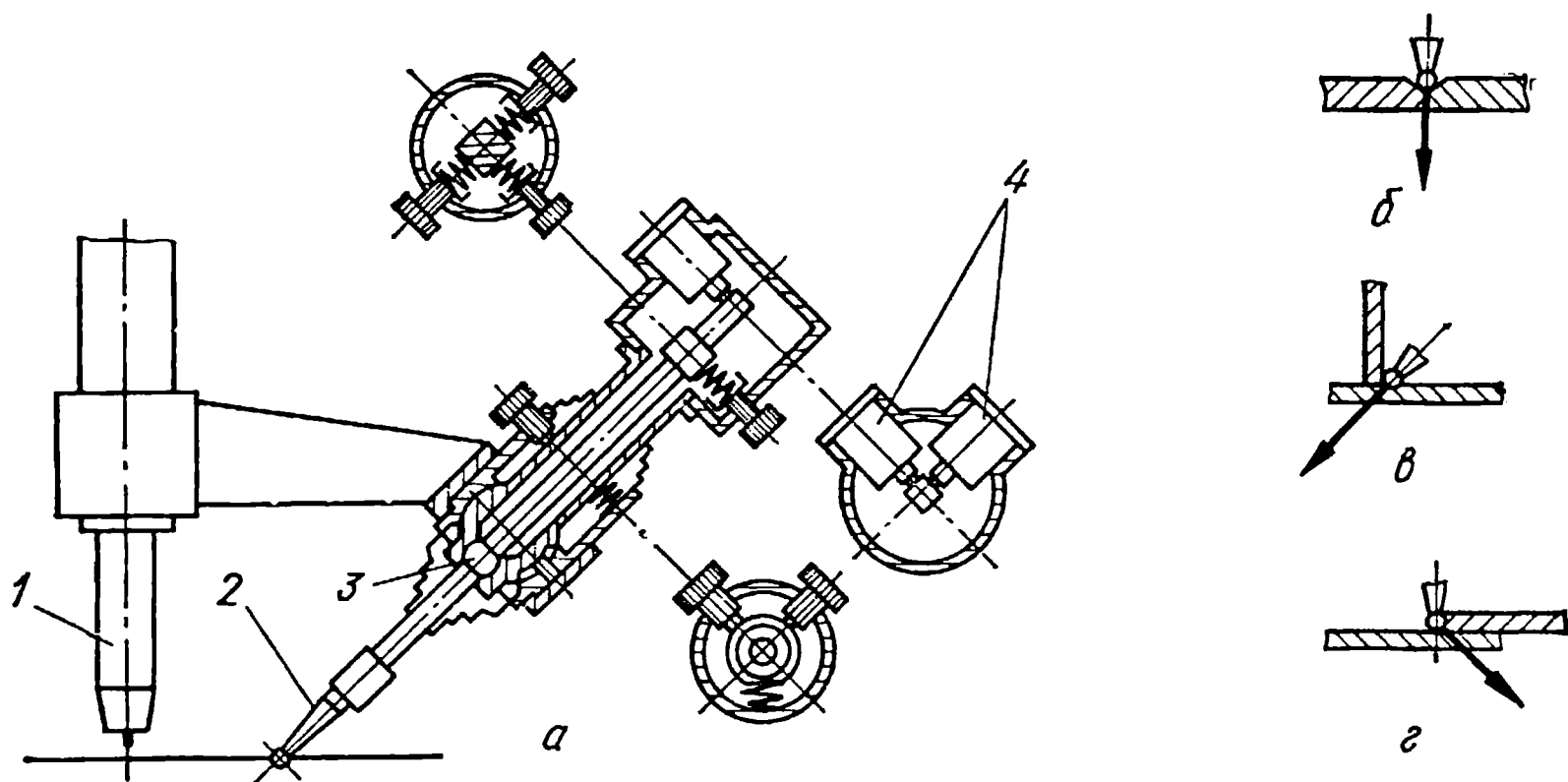


Рис. П.18. Схема установки двухкоординатного механического датчика (а) и направление результирующего усилия копирования при сварке стыковых (б) и угловых швов (в, г):

1 — сварочная горелка; 2 — сменный щуп; 3 — ось поворота щупа; 4 — первичные преобразователи перемещений по вертикали и горизонтали

контактных сопротивлений между шайбами. Достоинство этих преобразователей — малые габариты, а недостаток — нестабильность выходного сигнала из-за его зависимости от влажности угольных шайб и наличия угольной пыли между ними. Наиболее компактными из резисторных преобразователей являются тензорезисторные.

Среди бесконтактных преобразователей для электромеханических датчиков наиболее перспективны дифференциально-трансформаторные преобразователи. Наиболее простые из них имеют линейную характеристику в зоне от  $\pm 1,5$  до  $-2,5$  мм от нейтрального положения. При большем рассогласовании сигнал достигает предельного значения и наступает насыщение. Такая характеристика вполне удовлетворяет требованиям построения достаточно точных следящих систем.

## 11. Системы слежения за стыком с фотоэлектрическим датчиком

Системы с фотоэлектрическими датчиками принято классифицировать по признаку выходного сигнала датчика, используемого для оценки величины его смещения относительно контролируемого объекта. В сварочном производстве находят применение фотоэлектрические системы амплитудного, амплитудно-фазового и фазоимпульсного типов.

В системах амплитудного типа информация о положении наблюдаемого объекта содержится в амплитуде выходного сигнала датчика. Датчик амплитудной системы для слежения за контрастной линией (полосой) содержит два фотоприемника. Сигнал рассогласования пропорционален разности освещенностей фотоприемников. Равновесие системы наступает при одинаковой их освещенности. При слежении за границей «черное — белое» в датчике системы амплитудного типа имеется один фотоприемник, а равновесие системы наступает при определенном уровне сигнала фотоприемника. Амплитудные системы наиболее просты, но с невысокой точностью, так как чувствительны к колебаниям яркости и к другим помехам. Для повышения точности и помехоустойчивости амплитудных систем применяют схемы компенсации колебаний яркости с помощью дополнительных компенсационных фотоприемников. Применение в качестве фотоприемников позиционно-чувствительных фоторезисторов позволяет создать для амплитудных систем простые датчики с линейным выходом на большом участке зоны видимости. Сочетание позиционно-чувствительных и компенсирующих фоторезисторов, выполненных на одной подложке, позволяет с помощью одного компактного фотоприемника обеспечить в значительной мере компенсацию фоновых подсветок.

Более совершенной является амплитудно-фазовая система [48, 54]. Датчик этой системы (рис. П.19) содержит фотоприемник 1 (фоторезистор), а световой поток, падающий на фоточувствительный слой, модулируется механическим путем, например с помощью вибратора, перемещающего щелевую диафрагму 2 перпендикулярно к границе «черное—белое» или контрастной линии 3. При этом происходит сканирование поверхности изделия поперек границы или контрастной линии. Размер зоны сканирования (зоны видимости) в 3—4 раза превышает ширину контрастной линии в плоскости сканирования. Информация о положении наблюдаемого объекта содержится в угле сдвига фаз между сигналом  $U_{\text{вых}}$ , снимаемым с фотоприемника, и опорным напряжением. Полярность выходного сигнала определяется направлением, а амплитуда — величиной смещения контрастной линии относительно нулевой точки зоны видимости датчика. Примером следящей системы амплитудно-фазового типа может служить система У892, предназначенная для слежения по контрастной копирной линии, наносимой резцом на поверхности изделия. Фотоэлектрический датчик монтируется в одном блоке с осветителем 4, 5 (см. рис. П.19). Этот блок крепится к подвижной части корректора сварочного аппарата через привод настройки базового расстояния, необходимый для согласования положения сварочного инструмента и нейтрального положения шва не более  $\pm 1,0$  мм при сварке со скоростью до 180 м/ч и смещении стыка до 10 мм на длине в 1 м. Наибольшая скорость отработки исполнительного привода следящей системы 3 мм/с.

Большую точность слежения при прочих равных условиях обеспечивают системы фазоимпульсного типа. В этих системах также происходит сканирование поверхности изделия, причем применяется преимущественно круговое скани-

рование. Диаметр круга сканирования на порядок превышает ширину контрастной линии. Круговая развертка (круг сканирования) реализуется с помощью модулятора, питаемого опорным напряжением. Возможно также генерирование опорного сигнала модулятором. При пересечении лучом контрастной линии с фотоприемником датчика снимаются импульсы тока. Угол поворота модулятора, при котором появляются импульсы фототока от контрастной линии (фазовый угол), зависит от положения линии относительно центра круговой развертки. Эти импульсы являются разрешающими для прохождения тока в каждом полупериоде опорного напряжения. Результирующий сигнал на выходе измерительной части системы равен нулю только тогда, когда разрешающие импульсы проходят через 180 электрических градусов и совпадают с серединами полупериодов опорного напряжения, т. е.

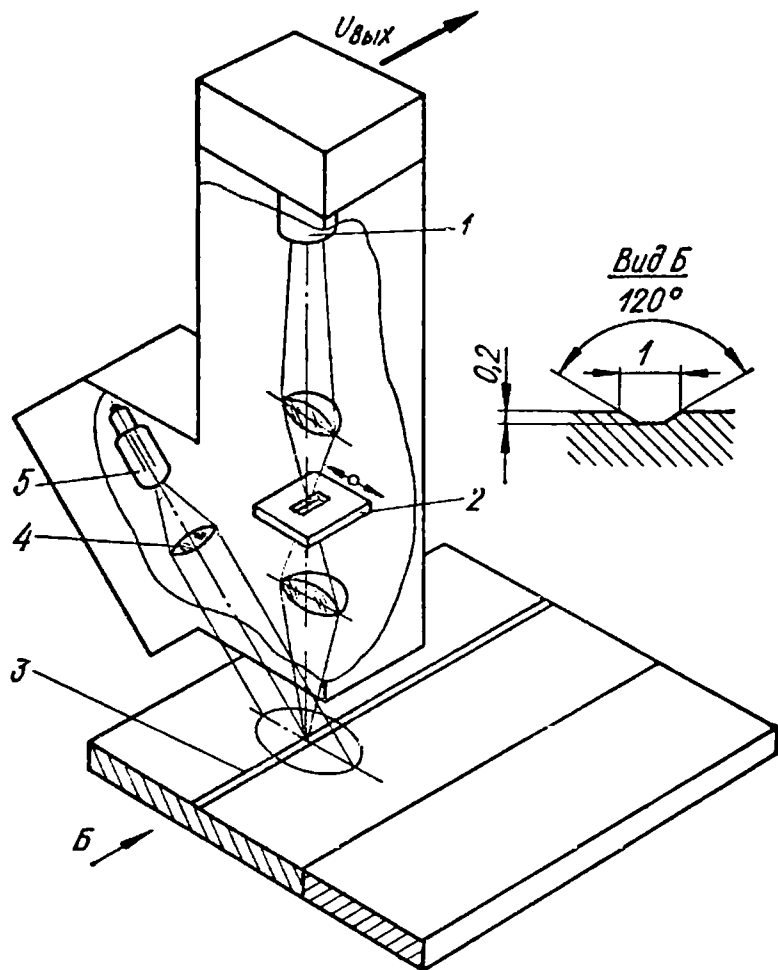


Рис. П.19. Датчик следящей системы У892

когда контрастная линия проходит через центр развертки. Преимуществом фазоимпульсной схемы является то, что сигнал рассогласования зависит только от величины смещения контрастной линии относительно центра развертки.

Одна из первых фазоимпульсных следящих систем для сварочного производства была разработана ВНИИэлектроприводом совместно с ЦНИИТмаш применительно к сварке стальных спиральношовных труб.

Фазоимпульсная система УСО [45], разработанная Институтом автоматики АН УССР, предназначена для наведения сварочного инструмента на середину зазора в стыке при сварке в защитных газах прямолинейных и круговых швов изделий из алюминиевых сплавов, нержавеющей стали, титановых сплавов, т. е. металлов со светлой поверхностью, на фоне которой стык выглядит как темная линия. Выходной сигнал датчика за один полупериод сканирования при наличии стыка в поле видимости представляет собой (после преобразования) два прямоугольных импульса с расстоянием между ними, определяемым шириной зазора в стыке. Сигнал управления пропорционален разности длительностей указанных прямоугольных импульсов. В системе предусмотрена схема запрета, отключающая слежение при наличии царапин вблизи стыка или технологических прихваток. Система обеспечивает: слежение при зазоре 0,15—5 мм; поле видимости 10 мм; наибольшую погрешность слежения  $\pm 0,5$  мм.

С помощью фотоэлектрических датчиков можно получить информацию о непосредственном положении электрода относительно середины зазора между свариваемыми элементами [9]. Для этого в поле зрения датчика должны находиться рабочий конец электрода и стык у входа в зону плавления. Датчик располагается под углом  $\approx 20^\circ$  к плоскости свариваемых листов; положение стыка контролируется перед точкой сварки на расстоянии  $\approx 10$  мм от края зоны плавления. Функциональная схема датчика и эпюры напряжений приведены на рис. П.20. Датчик и схема преобразования сигнала содержат два канала: канал электрода и канал стыка. Неподвижная диафрагма имеет два секреторных отверстия: одно с перемычкой посередине — в канале электрода; второе (без перемычки) — в канале стыка. Перемычка в канале электрода обеспечивает получение паузы  $\tau_1$ . Пауза  $\tau_2$  получается при прохождении точки визирования

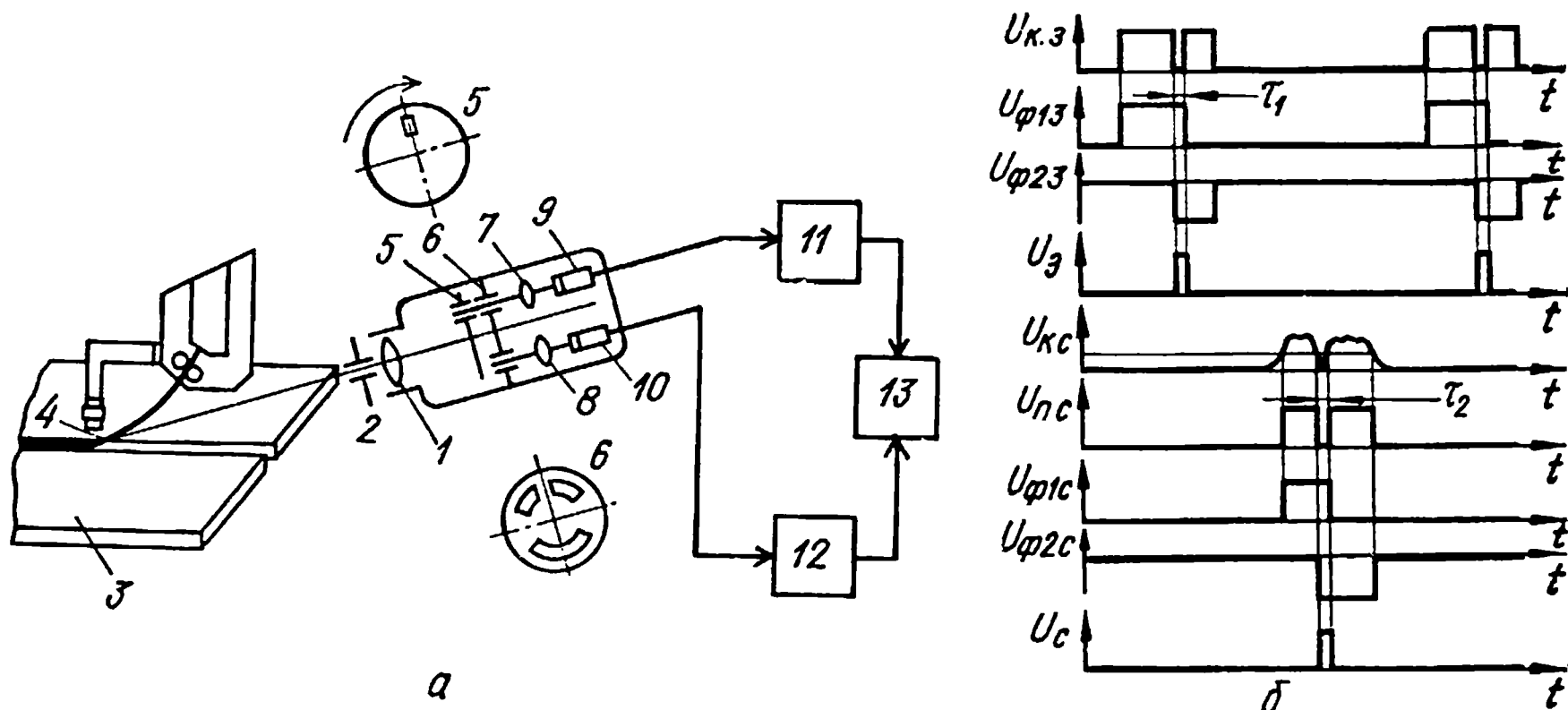


Рис. П.20. Фотоэлектрическая система направления электрода по стыку:

*a* — функциональная схема; *б* — эпюры напряжений на выходе функциональных элементов:  $U_{к.з}$  — фотоприемника электрода;  $U_{ф1з}$  и  $U_{ф2з}$  — формирователей положительного и отрицательного сигналов канала электрода;  $U_з$  — схема совпадения канала электрода;  $U_{к.с}$  — фотоприемника стыка;  $U_{п.с}$  — усилителя канала стыка;  $U_{ф1с}$  и  $U_{ф2с}$  — формирователей положительного и отрицательного сигналов канала стыка;  $U_с$  — схемы совпадения канала стыка; 1 — бленда; 2 — объектив; 3 — электрод сварочной головки; 4 — свариваемые элементы; 5 — вращающаяся диафрагма; 6 — неподвижная диафрагма; 7 — конденсор канала электрода; 8 — конденсор канала стыка; 9 — фотоприемник канала электрода; 10 — фотоприемник канала стыка; 11 — узел обработки сигнала фотоприемника в канале электрода; 12 — узел обработки сигнала фотоприемника в канале стыка; 13 — блок выработки сигнала рассогласования

через зазор в стыке. Электрод находится над стыком, когда пауза сигнала, соответствующая зазору в стыке, находится посередине между паузами, соответствующими перемычке диафрагмы канала электрода. При этом сигнал рассогласования отсутствует.

## 12. Телевизионная следящая система времяимпульсного типа

В системе (рис. П.21) синхрогенератор 1 вырабатывает управляющие импульсы, поступающие на вход узла 2 строчных и узла 3 кадровых синхроимпульсов. Узел 2 синхронизирует работу узла строчной развертки 12 передающей камеры 5 и запускает формирователь 7. Узел 3 синхронизирует работу узла кадровой развертки 9 передающей камеры 5 и запускает формирователь 8. Задний фронт выходного импульса формирователя 7 запускает формирователь 10, на выходе которого генерируется импульс левой части зоны видимости, все строки которой

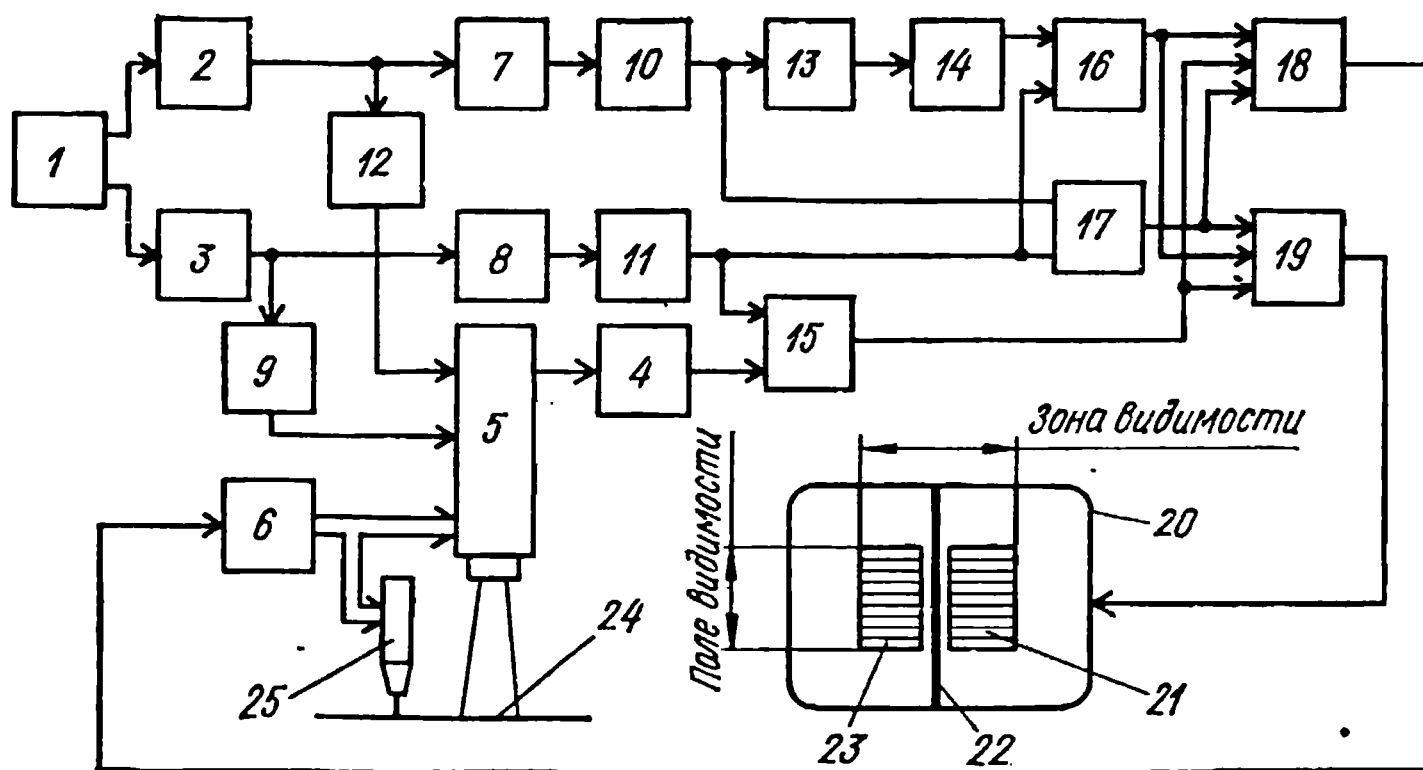


Рис. П.21. Функциональная схема телевизионной следящей системы времяимпульсного типа

создают растр «влево». Задний фронт импульса на выходе формирователя 10 запускает формирователь 13 зоны нечувствительности системы. Задний фронт выходного импульса формирователя 13 запускает формирователь 14, на выходе которого генерируется импульс правой части зоны видимости, все строки которой создают растр «вправо». Задний фронт импульса на выходе формирователя 8 запускает формирователь 11 импульса, соответствующего поля видимости 24 системы слежения. Этот импульс поступает на вход селектора 15 поля видимости. На выход селектора 15 проходят только те видеоимпульсы с выхода формирователя видеосигнала 4, которые по времени совпадают с импульсом, вырабатываемым формирователем 11. Селекторы 16 и 17 пропускают на вход формирователя сигнала рассогласования 18 и сумматора 19 видеоимпульсы, которые совпадают по времени с растрами соответственно «вправо» и «влево». Таким образом, если видеоимпульсы от светоконтрастной линии попадут в одну из частей растра видимости следящей системы, то привод 6 начнет обрабатывать возникшее рассогласование, перемещая передающую камеру 5 и сварочную горелку 25 в такое положение, при котором изображение светоконтрастной линии 22 на экране видеоконтрольного устройства 20 оказывается в зоне нечувствительности системы, т. е. между растрами «вправо» 21 и «влево» 23.

Точность времяимпульсного способа измерения определяется линейностью развертки и стабильностью размера последней. Погрешность слежения в большинстве систем времяимпульсного типа достигает  $\pm 1$  мм и более. Варианты времяимпульсного трехпозиционного измерения реализованы в следящей системе СУ-147, разработанной в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР. Достоинством этой системы является то, что она предусматривает применение серийной ПТУ без каких-либо переделок ее блоков и использование сигналов, передаваемых по соединительным кабелям ПТУ.

### 13. Система слежения за стыком с магнитным отклонением дуги

Следящая система с периодическим отклонением дуги внешним управляющим магнитным полем (УМП) эффективно применяется при сварке неплавящим-

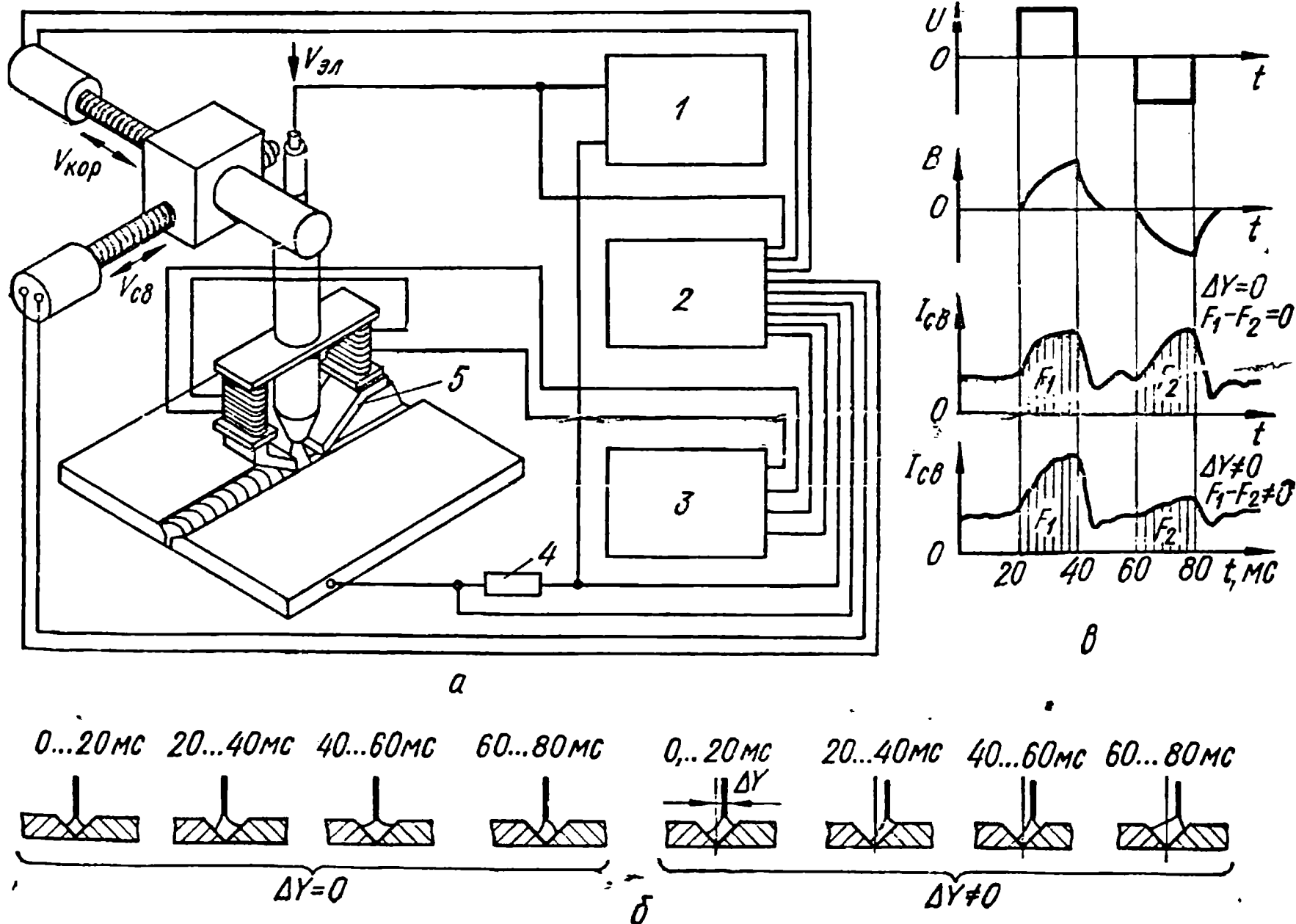


Рис. П.22. Система со сканированием сварочной дугой:

а — функциональная схема; б — схема горения дуги при отклонении ее поперек стыка; в — эюры параметров



ся электродом в инертном газе и плавящимся в смеси газов на основе аргона при мелкокапельном переносе металла.

Блок 3 (рис. П.22, а) управления отклоняющей системой 5, выполненной на основе электромагнита с П-образным сердечником, формирует импульсы напряжения  $U$  длительностью 20 мс с интервалом времени 20 мс (рис. П. 22, в). При этом в зазоре между полюсами электромагнита образуется пульсирующее УМП с индукцией  $B$ . Под действием УМП дуга смещается от осевой линии (рис. П.22, б), вследствие чего изменяется мгновенное значение тока (рис. П.22, в). При отсутствии смещения ( $\Delta y = 0$ ) оси электрода от оси стыка интегралы  $F_1$  и  $F_2$  двух последовательных отклонений тока оказываются одинаковыми. Как видно из рис. П.22, б—в, при  $\Delta y \neq 0$   $\Delta F = F_1 - F_2 \neq 0$ . Блок управления 2 на основе микроЭВМ сравнивает мгновенные значения тока и напряжения дуги со средними значениями, измеренными при отсутствии УМП, вычисляет текущие значения  $\Delta I_{св}$  и их интегралы во время каждого отклонения дуги (отдельно влево и вправо). Вычисленная разность интегралов преобразуется в сигнал управления корректором сварочной головки. Шунт 4, включенный последовательно с источником питания 1, служит для измерения сварочного тока.

#### 14. Однофазный тиристорный прерыватель для ЭШС

Прерыватель предназначен для управления процессом ЭШС с применением модуляции мощности. Выполнен в виде силового блока 1 (рис. П.23) и схемы управления, включающей мультивибратор, собранный на триггере 3 и задатчиках времени импульсов и паузы 1 и 2. Сигнал с выхода триггера 3 поступает на входы задатчиков напряжения в импульсе 4 и в паузе 5. В зависимости от состояния триггера потенциал с выхода одного из задатчиков напряжения через схему сравнения и интегратор 6 поступает на вход фазосдвигающего устройства 8. Туда же подается пилообразное напряжение с генератора 7. Соответственно напряжению на входе интегратора передний фронт импульсов на выходе усилителя 9 сдвигается по отношению к нулю напряжения, приложенного к тиристорам контактора 12.

Напряжение обратной связи  $u_{o.c.}$ , пропорциональное напряжению на ванне, с трансформатора 13 подается на вход схемы сравнения вместе с задающим напряжением  $U_3$ . Напряжение рассогласования, поступая на вход интегратора, изменяет угол проводимости тиристоров так, чтобы разность  $U_3 - U_{o.c.}$  свести к минимальному значению. При изменении нагрузки и напряжения питающей сети в допустимых пределах напряжение на ванне остается неизменным.

Прерыватель снабжен быстродействующими блоками защиты 10 и 11, принцип работы которых основан на сравнении выпрямленного напряжения питающей сети и выпрямленного тока нагрузки. Если полуволна тока пропадает по какой-либо причине, то блоки 10 и 11 снимают в течение одного полупериода импульсы поджигания с тиристоров контактора 12.

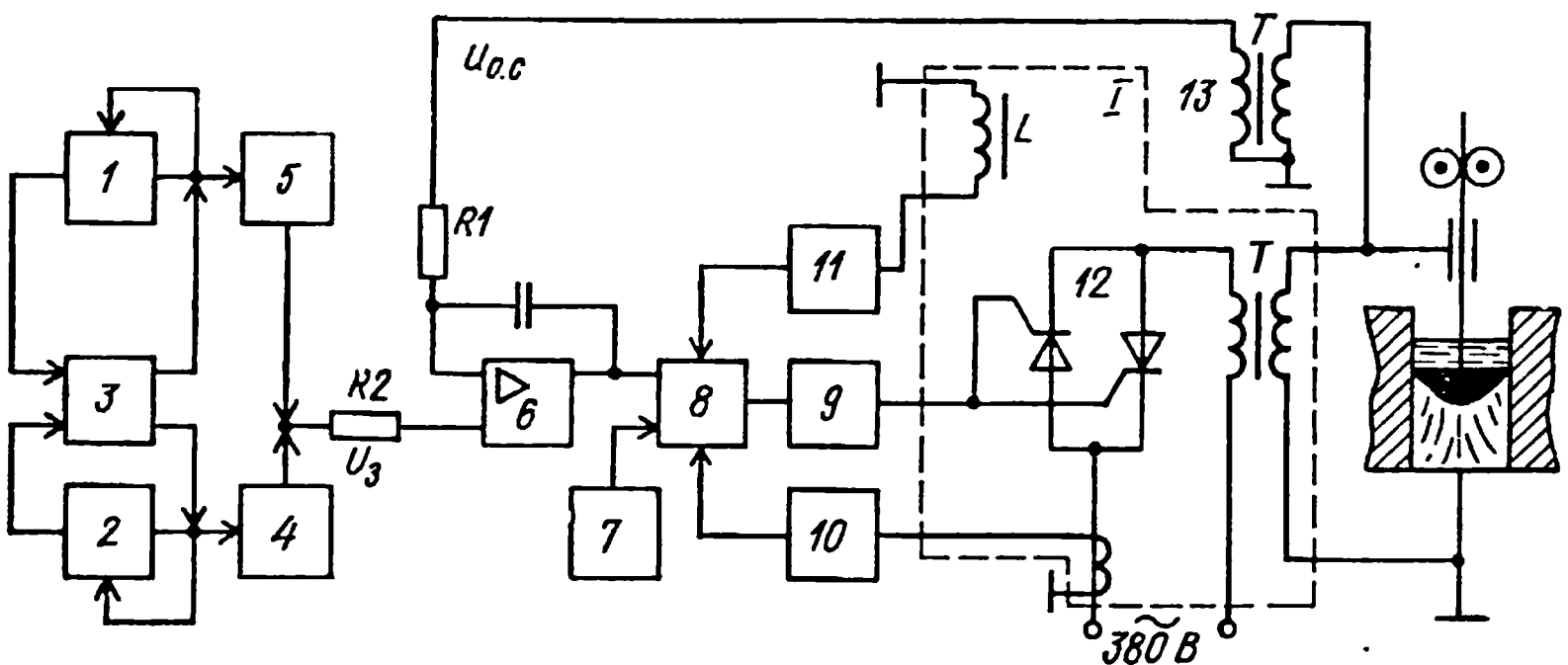


Рис. П.23. Однофазный тиристорный прерыватель для ЭШС

## Техническая характеристика тиристорного прерывателя

Потребляемая мощность, В · А . . . . .	100
Расход охлаждающей воды, л мин . . . . .	4
Габаритные размеры, мм . . . . .	990 × 300 × 540
Масса, кг . . . . .	155
Максимальный коммутируемый ток при напряжении 380 В, кА . . . . .	2
Диапазон регулирования:	
импульса, с . . . . .	0,1 — 2
паузы, с . . . . .	0,1 — 1

### 15. Система автоматического регулирования тока ЭШП

В состав системы (рис. П.24) входит программный задатчик тока *ПЗ*, регулятор, установка для ЭШП, включающая кристаллизатор *1*, пластинчатый электрод *2* и питающий трансформатор *Т1*.

Напряжение, пропорциональное току ЭШП, снимается с резистора *R1* и после выпрямления и сглаживания *L1C1* фильтром поступает на резистор *R2*. Изменение напряжения на этом резисторе суммируется на потенциометре *RP* с опорным падением напряжения от стабилизированного источника. Усиленная усилителем *У1* разность входных сигналов поступает на усилитель мощности *У2*, нагрузкой которого являются обмотки *L3* и *L4* электромашинного усилителя ЭМУ. При отклонении тока ЭШП от заданного напряжение на выходе ЭМУ изменяется, причем полярность его зависит от знака рассогласования. Двигатель *М2* перемещает электрод *2* через редуктор, поддерживая ток ЭШП с заданной точностью. На входе регулятора осуществлена отрицательная обратная связь по приращению тока сварки (резистор *R3*, конденсатор *C2*, входное сопротивление усилителя), ЭМУ охвачен жесткой отрицательной обратной связью по скорости двигателя (обмотка управления *L5*, резисторы *R5*, *R6*, *R7*). Кроме того, ЭМУ совместно с усилителем *У2* охвачен отрицательной обратной связью по приращению скорости (резистор *R4*; конденсатор *C2*). Изменение программы работы регулятора по току осуществляется реверсивным двигателем *М1*, который перемещает движок потенциометра *RP*, меняя установку регулятора. В результате применения быстродействующего регулятора тока повышается точность поддержания тока ЭШП до 1,5—2 %, автоматизируется процесс наведения шлаковой ванны и установления заданного режима ЭШП. Последний изменяется по программе автоматически без участия оператора.

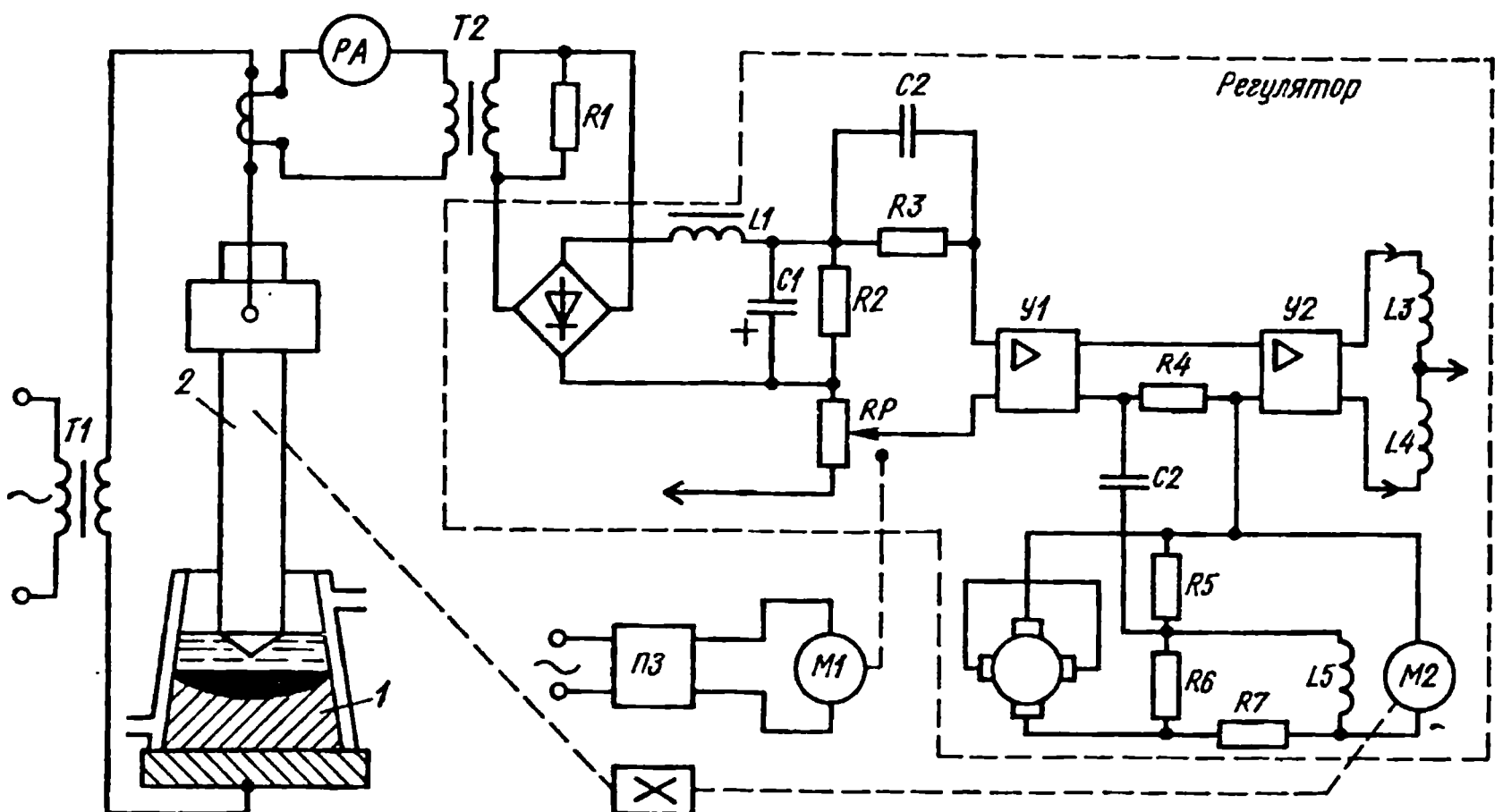


Рис. П.24. Функциональная схема системы регулирования тока аппарата для ЭШП

## 16. Регулятор уровня жидкого металла ванны при ЭШС

Работа регулятора (см. рис. 3.19) поясняется в электрической схеме (рис. П.25). Напряжение с обмотки *II* трансформатора *T1* поступает на двухполупериодную схему выпрямления со средней точкой. Стабилизация напряжения — 12 В осуществляется с помощью транзисторов *VT1*, *VT2* и стабилитрона *VD11*. Подбором резистора *R1* выбирается рабочий ток стабилизации. Конденсаторы *C1* и *C2* выполняют роль сглаживающего фильтра. Стабилизированное напряжение — 12 В через дополнительный стабилизирующий триод *VT4* подается на генератор импульсов прямоугольной формы частотой 6000 Гц, собранный на транзисторах *VT5*, *VT6* и представляющий собой мультивибратор с коллекторно-базовыми индуктивными связями. Цепочка *C4*, *R5* служит для коммутации работы транзисторов *VT5* и *VT6*, прямоугольные импульсы с которых подаются на обмотку *II* трансформатора *T2*. Выходное напряжение с обмотки *IV* трансформатора *T3* питает усилитель мощности, собранный на транзисторах *VT7* и *VT8*.

Усиленный сигнал мультивибратора подается на первичную обмотку *I* трансформатора *T3*. Вторичная обмотка *II* трансформатора *T3*, питающая индуктивный датчик прямоугольными импульсами частотой 6000 Гц, имеет несколько отводов для подбора соответствующего напряжения питания датчика III- и II-образного. При отключении тумблера *S2* схема регулятора работает с П-образным датчиком. При достижении уровнем жидкого металла зоны работы датчика на измерительных обмотках появляется сигнал, пропорциональный уровню металла, который поступает через предварительный усилитель на первичную обмотку *I* трансформатора *T4*. Выходное напряжение с обмотки *II* трансформатора *T4* питает детектор, выполненный в виде мостовой схемы (диоды *VD7* — *VD10*). Выпрямленный сигнал через эмиттерный повторитель *VT3*, фильтр *R13*, *C8* и ограничивающее сопротивление *R14* подается на контактный микроамперметр *M303K* РмА, который используется в качестве двухпозиционного регулятора. Микроамперметр включен в диагональ мостовой схемы (транзистор *VT3*, резисторы *R17*, *R16*, *R12*), которая запитана от собственного стабилизатора (*VD12—VD14*). Это сделано для устранения сигнала начального разбаланса, возникающего вследствие неидентичной намотки обмоток датчика.

Стабилитрон *VD16* предусмотрен для защиты прибора *M303K* от перенапряжения. Замыкающий контакт двухпозиционного реле *K1*, обмотка которого питается током постоянного напряжения, используется для управления приводом подъема формирующих ползунов.

## 17. Основные технические характеристики тиристорных контакторов

Наименование параметров	Тип контактора	
	КТ-IV4	КТ-03V4
Напряжение питающей сети номинальное, В	380, 220	380, 220
Ток номинальный, А при ПВ не более		
50 %	200	800
20 %	250	850
Ток максимальный, А при ПВ не более		
20 %	280	1100
Мак имальное ПВ, %	50	50
Максимальная длительность импульса тока, с	2	20
Параметры импульсов управления:		
напряжение, В	15—30	15—25
ток не более, А	5	0,4
длительность, мкс	100—500	100—500
Тип тиристоров	ТВ-200-9	ТВ-800-9
Масса, не более, кг	6	17

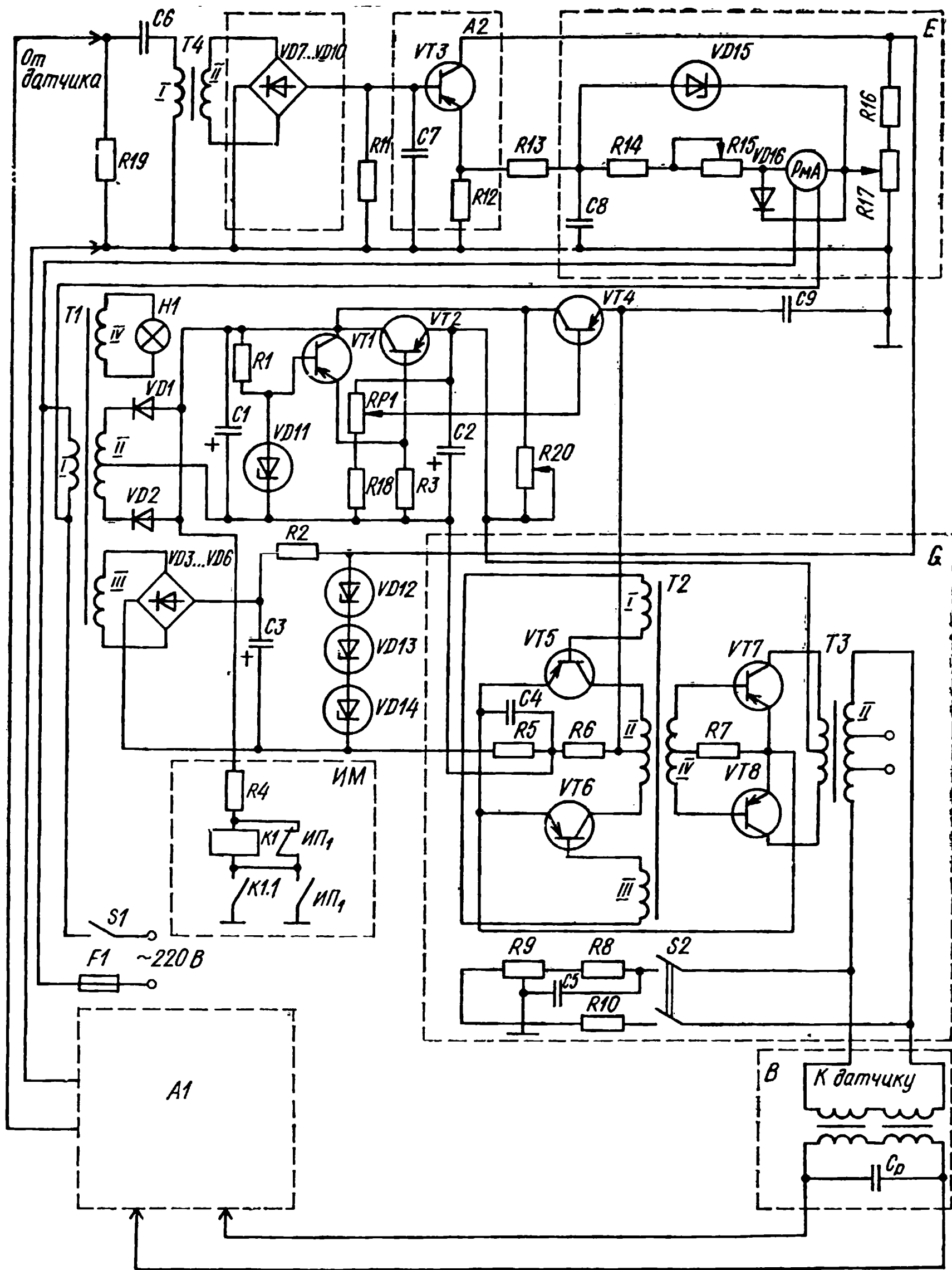


Рис. П.25. Принципиальная электрическая схема регулятора уровня жидкого металла

### 18. Регуляторы времени типа РВТ

Основными элементами регуляторов времени РВТ являются маломощные тиристоры типа КУ-201. Принципиальные схемы блоков коммутации, задания времени и фазовращателя приведены на рис. П.26, рис. П.27 и рис. П.29 соответственно.

Работа регулятора. После включения регулятора в сеть схема устанавливается в исходное положение, при котором все пересчетные ячейки блока коммутации находятся в нулевом положении. При замыкании педали  $S1$  (рис. П.26) опе-

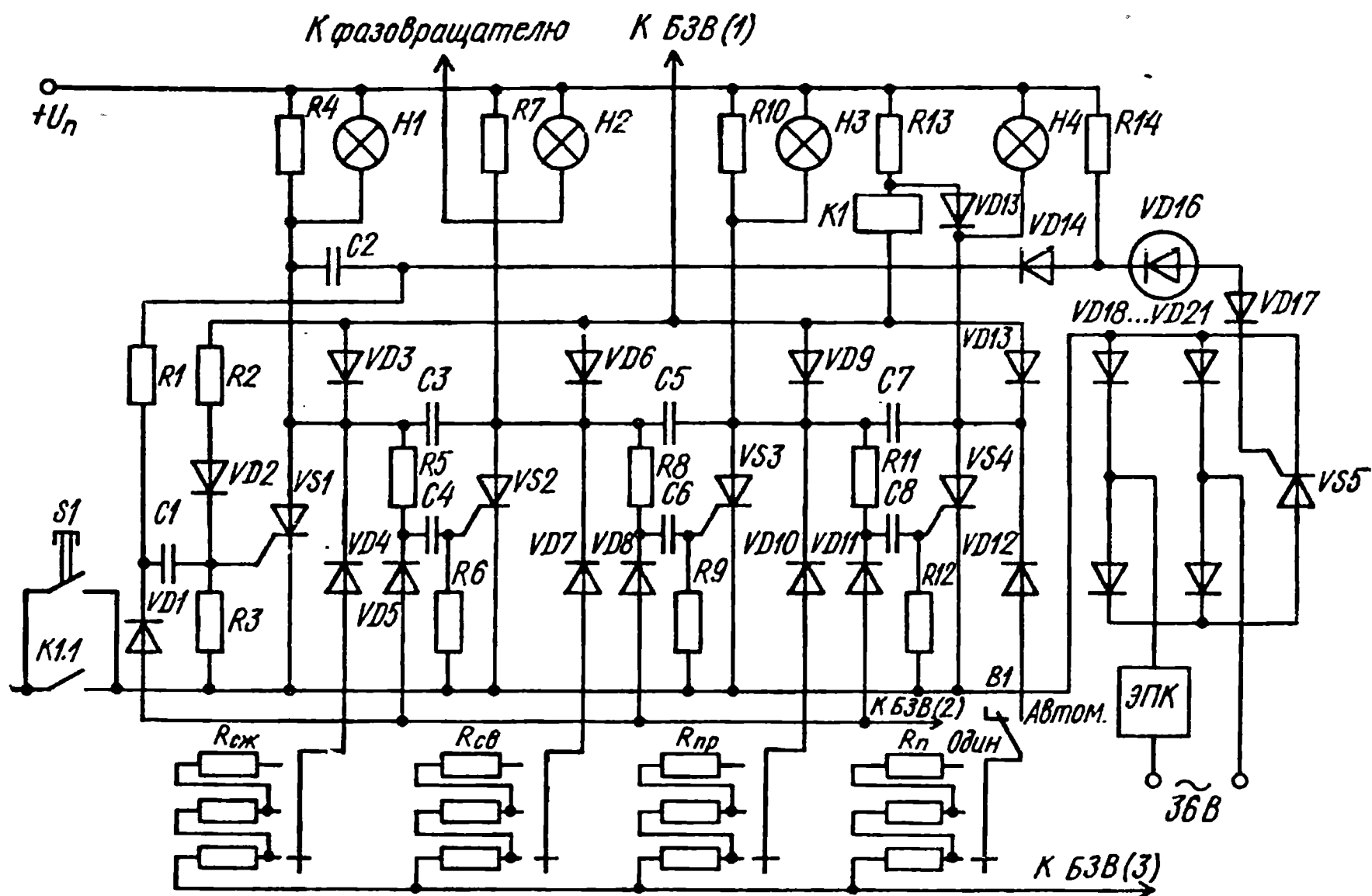


Рис. П.26. Блок коммутации операций (БЗВ — блок задания времени — см. рис. П.27)

ратором-сварщиком на схему блока коммутации подается напряжение питания, а через  $R2 \div VD2$  — положительное напряжение на управляющий электрод маломощного тиристора  $VS1$ , управляющего первой операцией цикла — сжатием. Тиристор  $VS1$  открывается, блок задания времени получает питание через диод  $VD3$ , а индикатор  $H1$  сигнализирует о том, что ячейка находится во включенном состоянии. Через открытый тиристор  $VS1$  подается напряжение на реле  $K1$ , замыкающий контакт которого блокирует педаль. Одновременно через  $R14, VD16, VD17$  положительное напряжение подается на управляющий электрод тиристора  $VS5$ , который через диоды  $VD18—VD21$  подключает к цепи переменного тока электропневматический клапан ЭПК, обеспечивающий подачу воздуха в цилиндр пневмопривода сварочной машины.

В зависимости от установленной величины сопротивления  $БЗВ$  отсчитывает время первой операции «сжатие» в периодах и после его окончания на выходе блока появляется импульс, который через диод  $VD6$  и конденсатор  $C4$  включает тиристор  $VS2$  ячейки «сварка». Тиристоры  $VS3, VS4$  включиться не могут, так как диоды  $VD8, VD11$  будут заперты положительным потенциалом анодов закрытых тиристоров предыдущих ячеек и не пропускают выходной импульс от блока задания времени. Включение тиристора  $VS2$  сигнализируется индикатором  $H2$ . Одновременно через открытый тиристор  $VS2$  замыкается цепь питания фазовращателя. После включения  $VS2$  тиристор  $VS1$  предыдущей ячейки выключается вследствие перезаряда конденсатора  $C3$  (положительный потенциал прикладывается к катоду  $VS1$ ). Ячейка на тиристоре  $VS2$  обеспечивает операцию «сварка» в течение времени, которое задается величиной сопротивления  $R_{св}$ . После отсчета времени, соответствующего этой операции, блок задания времени вырабатывает импульс напряжения, который через диод  $VD8$  и конденсатор  $C6$  включает тиристор  $VS3$  ячейки «проковка». Отсчет времени «проковка» и далее «паузы» происходит аналогично предыдущим операциям.

После включения тиристора  $VS4$  операции «паузы» через диод  $VD14$  шунтируется напряжение, подаваемое в цепь управляющего электрода тиристора  $VS5$ , который выключается и обеспечивает выключение электропневматического клапана и снятие давления с электродов сварочной машины. Время операции «пауза» отсчитывается аналогично другим операциям, если переключатель  $B1$  находится в положении «автомат». После отсчета времени «пауза» снова начинается отсчет времени «сжатие». Если же переключатель  $B1$  находится в поло-

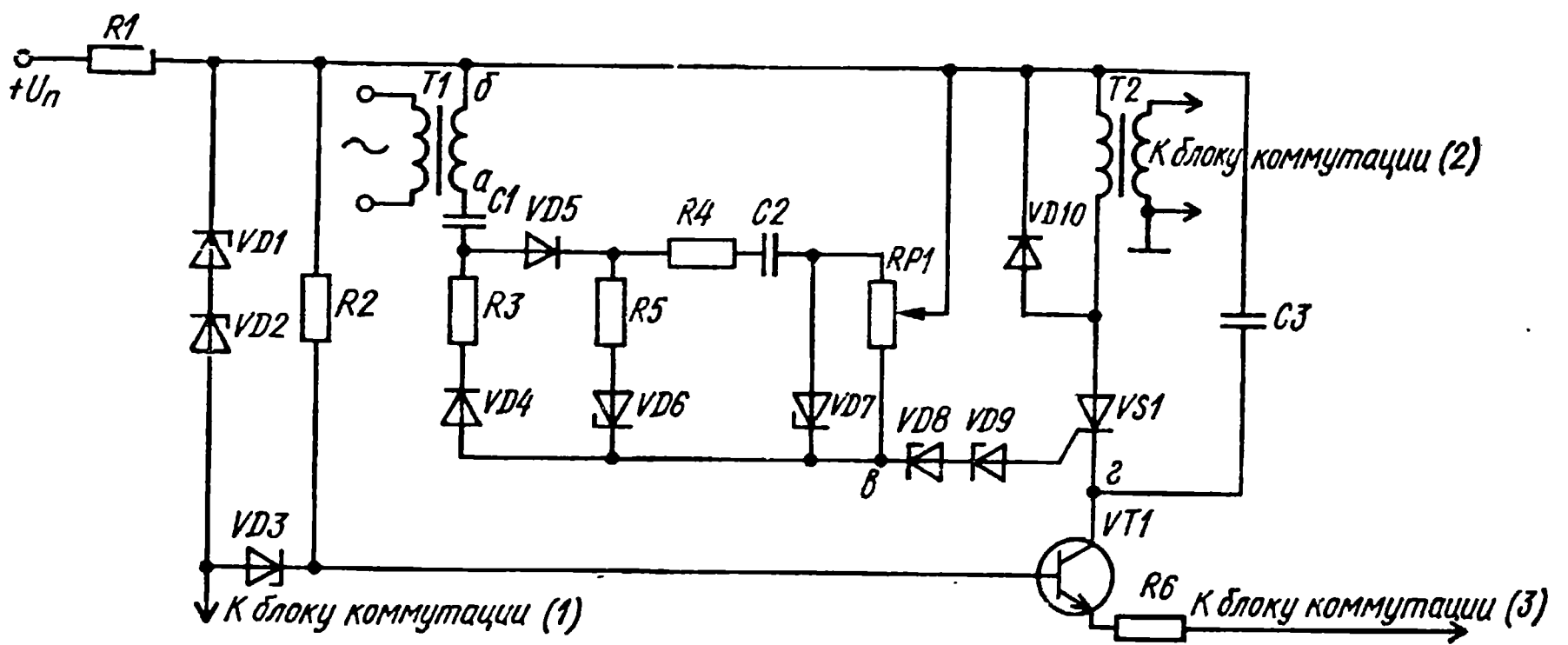


Рис. П.27. Блок задания времени

жении «одиночный», то цикл прекращается на операции «пауза», а для повторного запуска схемы необходимо отпустить и снова нажать педаль.

Принципиальная схема БЗВ приведена на рис. П.27. Основным элементом схемы является генератор тока на транзисторе  $VT1$ , который включается импульсом напряжения от блока коммутации. Генератор тока собран по схеме эмиттерного повторителя, база которого подключена к стабилизированному источнику напряжения  $+8\text{В}$  (стабилитрон  $VD3$ ), а времязадающий резистор  $R7$  находится в цепи эмиттера. Напряжение на конденсаторе  $C3$  изменяется по линейному закону, задаваемому  $R6$  и  $R_{св}$  (рис. П.26) и через резистор  $R6$  прикладывается к стабилитронам  $VD8$  и  $VD9$  и управляющему переходу тиристора  $VS1$  (точки  $в, г$ ). С этим напряжением суммируются синхронизирующие импульсы, вырабатываемые узлом синхронизации и снимаемые с части потенциометра  $RP1$ .

Узел синхронизации работает следующим образом. К точкам  $а, б$  через трансформатор  $T1$  подключено переменное напряжение  $u_{а,б}$  питающей сети (рис. П.28). Конденсатор  $C2$  заряжается по цепи (точка  $а$ )  $C1, VD5, R4, C2, RP1$ , точка  $б$ . Когда напряжение на  $C2$  достигнет напряжения переключения диода  $VD6$ , последний открывается и конденсатор быстро разряжается через  $R5, RP1$ . Стабилитрон  $VD7$  ограничивает и стабилизирует амплитуду синхронизирующих импульсов на потенциометре  $RP1$ . Конденсатор  $C1$  служит для формирования синусоидального напряжения с окружающей фазой по отношению к напряжению сети. Этим обеспечивается компенсация вынужденного угла сдвига синхроимпульсов, вызванного конечным временем заряда конденсатора  $C2$ , через ограничивающий резистор  $R4$  и таким образом осуществляется жесткая привязка синхроимпульсов к нулевому значению синусоиды питающего напряжения.

Когда результирующее напряжение в точках  $в, г$  (рис. П.28) достигнет напряжения пробоя стабилитронов  $VD8, VD9$ , синхроимпульс поступает на управляющий электрод тиристора

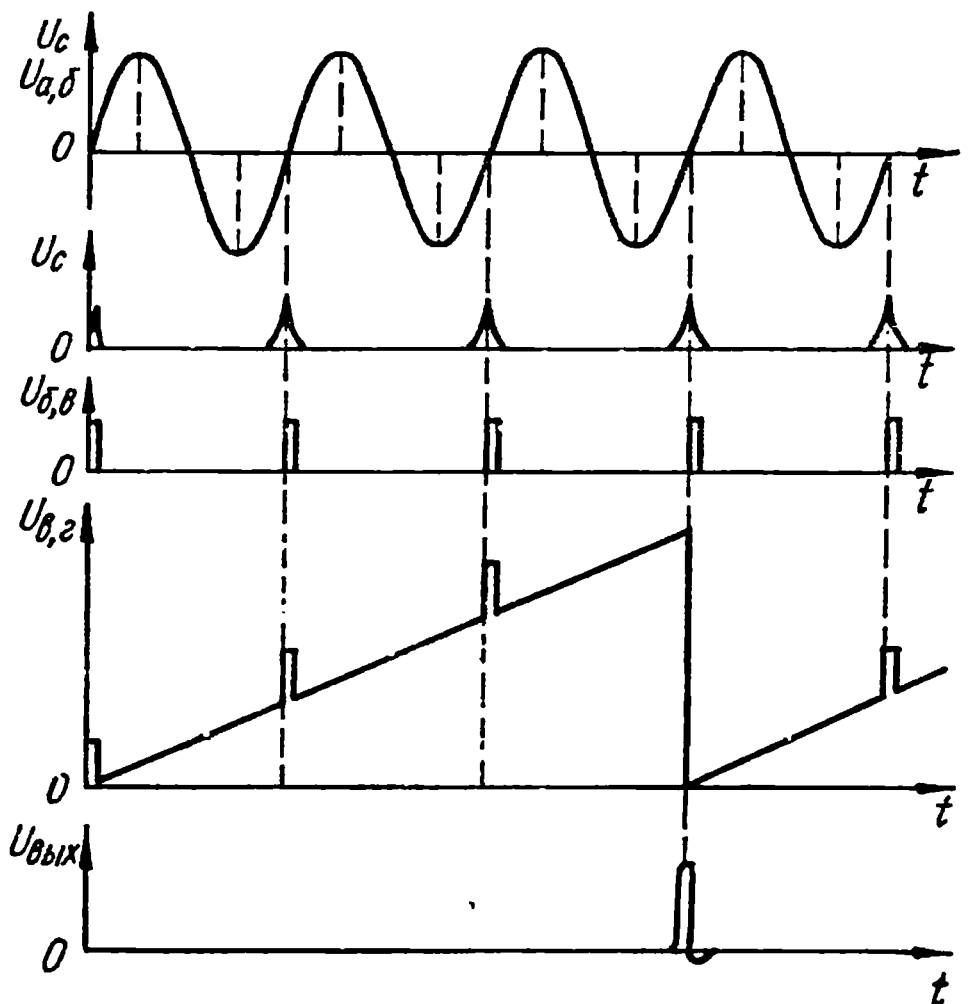


Рис. П.28. Циклограмма работы БЗВ



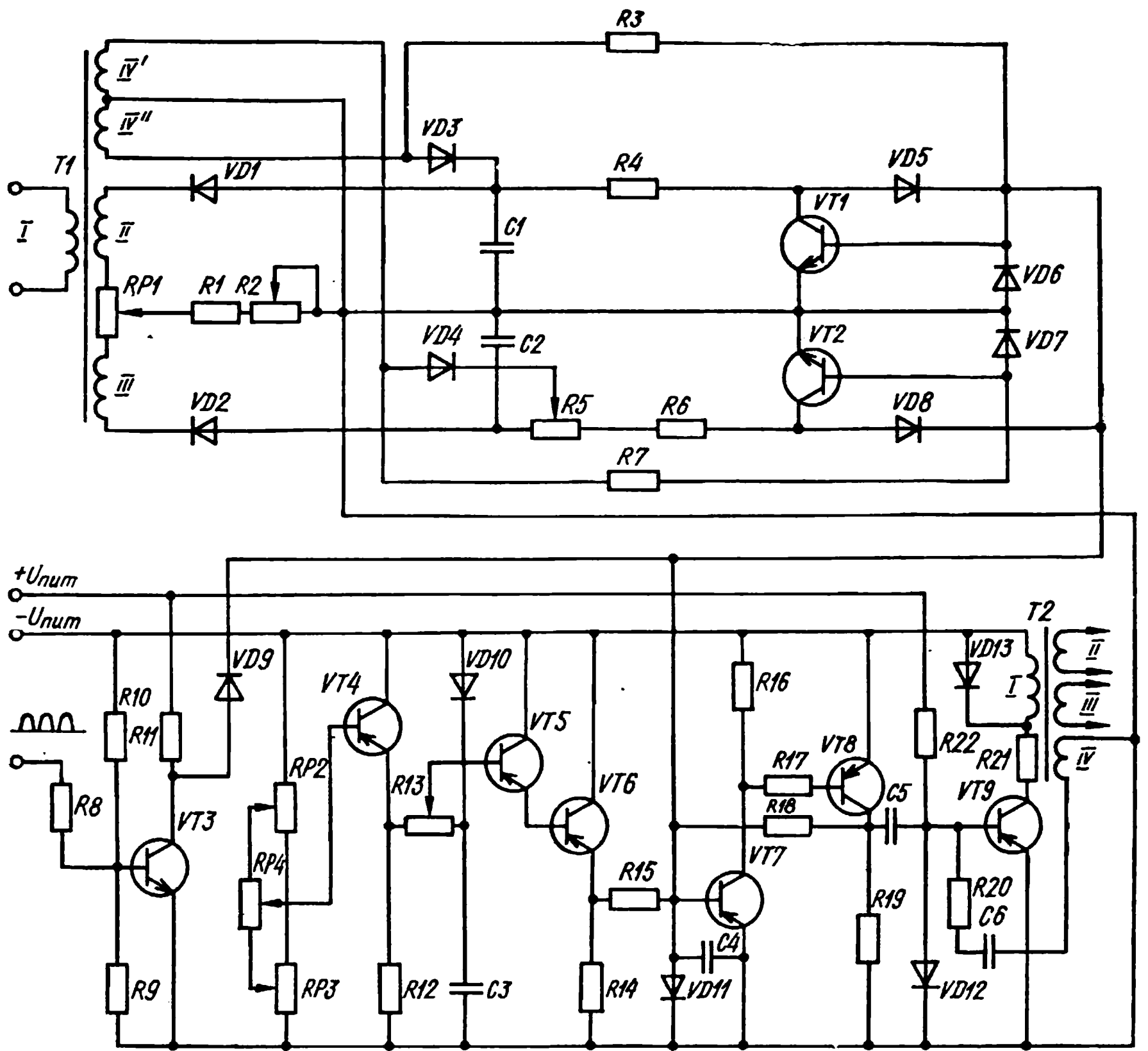


Рис. П.29. Принципиальная схема фазовращателя

$VT1$  и открывает его. Конденсатор  $C3$  разряжается через этот тиристор и первичную обмотку трансформатора  $T2$ . Положительный импульс напряжения, снимаемый со вторичной обмотки трансформатора  $T2$ , поступает на входы пересчетных ячеек блока коммутации операций (см. рис. П.26) и включает соответствующий тиристор.

Принципиальная схема фазовращателя со стабилизацией среднего значения тока при колебаниях напряжения сети приведена на рис. П.29. В исходном состоянии схема обесточена. Напряжение питания  $U_{пит}$  подается на схему от блока коммутации в момент времени, соответствующий началу операции «сварка», и обеспечивает питание транзисторов  $VT3—VT9$ . Первичная обмотка  $I$  трансформатора  $T1$  подключена к напряжению сети, питающему сварочную машину. Синусоидальные напряжения на обмотках  $II—IV$  этого трансформатора показаны на рис. П.30, а, б. Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  заряжаются через диоды  $VD3$  и  $VD4$  до амплитудного значения напряжений, действующих на обмотках  $IV'$  и  $IV''$ . Разряд их происходит в следующий полупериод через диоды  $VD1$ ,  $VD2$  обмотки  $II$ ,  $III$ , резисторы  $R1$ ,  $R2$ , потенциометр  $RP1$ .

Напряжение на обмотках  $II$ ,  $III$  выбирается в 5—7 раз больше, чем напряжение на обмотках  $IV'—IV''$ . Это необходимо для поддержания амплитудного значения на напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  примерно до момента перехода синусоиды напряжения обмоток  $IV'—IV''$  через нуль. Это условие необходимо для нормальной работы схемы стабилизации сварочного тока при колебании напряжения питающей сети.

Результирующие напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  показаны на рис. П.30, в, г. Напряжение, соответствующее заштрихованным участкам, шунтируется транзисторами  $VT1$  и  $VT2$ , а напряжение, соответствующее незаштрихованным участкам, через диоды  $VD5$ ,  $VD8$  подается на вход схемы сравнения, собранной на транзисторах  $VT7$ ,  $VT8$ . Сюда же подается напряжение отрицательного смещения через резистор  $R15$ .

Передний фронт отрицательного смещения определяет модуляцию импульса сварочного тока, а его амплитуда — нагрев, т. е. форма отрицательного импульса смещения полностью определяет форму импульса сварочного тока. Для получения модулированного переднего фронта импульса смещения используется напряжение заряда конденсатора  $C3$  через резистор  $R13$  до напряжения, равного выходному напряжению эмиттерного повторителя на транзисторе  $VT4$ . Это напряжение зависит от величины сопротивлений  $RP4$  («нагрев»),  $RP3$  («минимальный нагрев») и  $RP2$  (« $\cos\varphi$ »). Постоянная времени  $\tau = (R13) \cdot C3$  выбирается с таким расчетом, чтобы заряд конденсатора происходил примерно 5 периодов, т. е. максимальная длительность модуляции равна 0,1 с.

Напряжение с конденсатора  $C3$  подается на вход эмиттерного повторителя, собранного по схеме составного транзистора  $VT5$ ,  $VT6$ . После эмиттерного повторителя с резистора  $R14$  отрицательное напряжение через резистор  $R15$  поступает на вход схемы сравнения (рис. П.30, д). В исходном положении оба транзистора схемы сравнения находятся в закрытом состоянии. Когда потенциал базы  $VT7$  становится равным примерно нулю, этот транзистор открывается. Падение напряжения на резисторе  $R16$  через  $R17$  открывает  $VT8$ . Через резистор  $R18$  осуществляется положительная обратная связь, что способствует четкому переходу схемы из одного состояния в другое, когда оба транзистора открыты. Для возвращения схемы сравнения в исходное состояние ( $VT7$ ,  $VT8$  закрыты) при наличии сильной положительной обратной связи через  $R18$  на базу  $VT7$  в начале каждого полупериода подаются сравнительно мощные зондирующие импульсы, формируемые каскадом на транзисторе  $VT3$ . На вход этого транзистора подается выпрямленное напряжение, снимаемое с силового контактора. Этот же каскад обеспечивает автоматический упор по полнофазному току. Пока вентиль силового контактора проводит ток, на нем отсутствует напряжение, следовательно транзистор  $VT3$  будет закрыт отрицательным смещением, поступающим на его базу через резистор  $R10$ . Положительное напряжение с коллектора  $VT3$  через диод  $VD9$  подается на вход схемы сравнения (база  $VT7$ ) и запирает ее до окончания протекания тока через силовой вентиль независимо от величины напряжения, определяемого  $RP4$ , задающим нагрев.

При срабатывании схемы сравнения (рис. П.30, е) передний фронт прямоугольных отрицательных импульсов, возникающих на резисторе  $R19$ , через конденсатор  $C5$  подается на вход выходного усилителя, собранного на транзисторе  $VT9$  по схеме с положительной обратной связью (обмотка  $IV$  трансформатора  $T2$ ). Выходные импульсы этого усилителя, снимаемые с обмоток  $II$  и  $III$  трансформатора  $T2$ , подаются на схему поджигания тиристорного или игнитронного контактора (рис. П.30, ж).

При колебаниях напряжения сети изменяется положительное пилообразное напряжение на входе схемы сравнения и происходит сдвиг выходных импульсов

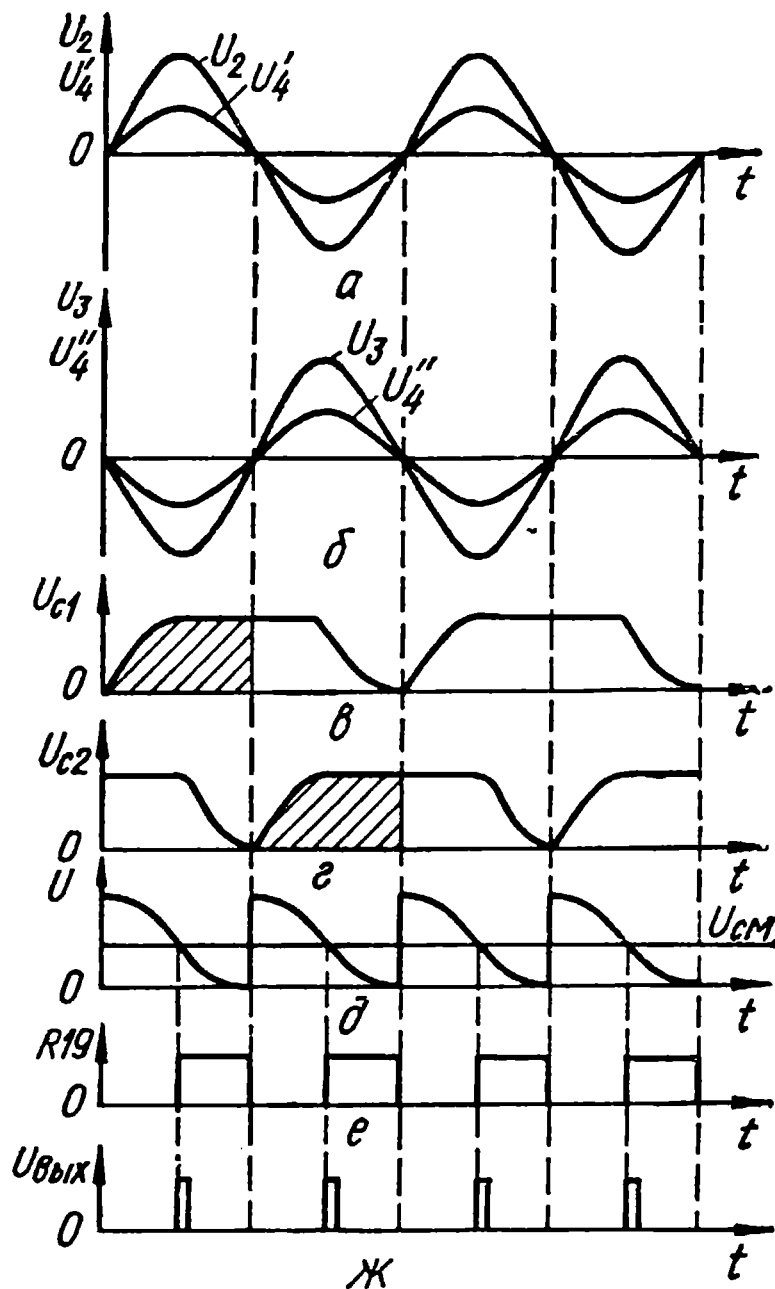


Рис. П.30. Циклограмма работы фазовращателя

фазовращателя, который обеспечивает компенсацию изменения сетевого напряжения, т. е. стабилизирует напряжение на первичной обмотке сварочного трансформатора (рис. П.30, *д—ж*).

### 19. Универсальный автоматический регулятор УРТ-3

Особенность схемы регулятора (рис. П.31) — наличие в ней встроенной электрической модели сварочной машины. Во время паузы между сварками входной измерительный узел подключается к модели, а во время прохождения сварочного импульса входной узел подключается к датчику тока или напряжения сварочной машины. Таким образом, несмотря на импульсный характер изменения сварочного тока (особенно это существенно при шовной сварке), регулятор работает непрерывно, так как на время пауз на вход измерительного узла подается напряжение  $U_m$  от модели, а во время прохождения сварочного тока — информация с датчиков о фактическом значении  $U_{эл}(I_{св})$ . Это позволяет повысить точность регулирования в динамических режимах, которые характерны для процессов контактной сварки.

В исходном состоянии, когда сварочный ток выключен, регулятор работает только с моделью, имитирующей контактор и трансформатор машины. Модель собрана на маломощных тиристорах  $VS1$ ,  $VS2$ , дросселе  $L1$  и резисторах  $R3$ ,  $R4$ . На вход схемы регулятора через размыкающий контакт  $K2.1$  подается напряжение  $U_m$ , снимаемое с резистора  $R4$ . Это напряжение сравнивается с напряжением уставки  $U_0$ , задаваемым потенциометром  $RP1$ . Сигнал рассогласования  $\Delta U = U_0 - U_m$  подается на вход интегратора, собранного на резисторе  $R6$ , конденсаторе  $C1$  и транзисторе  $VT1$ . После интегрирования напряжение поступает на вход фазовращателя, состоящего из двух частей: схемы формирования пилообразного напряжения, собранной на транзисторах  $VT9$ ,  $VT10$  и цепи  $R25$ ,  $C4$ , а также компаратора, собранного на транзисторах  $VT2$ ,  $VT3$ . На вход  $VT10$  подается выпрямленное по двухполупериодной схеме напряжение, синхронизированное с напряжением питающей сети  $U_c$ . В момент прохождения  $U_c$  через нулевое значение транзисторы  $VT10$ ,  $VT9$  открываются и на резисторе  $R25$  формируются короткие импульсы положительной полярности частотой 100 Гц. Через диод  $VD9$  эти импульсы заряжают конденсатор  $C4$  до амплитудного значения. В паузах между импульсами конденсатор перезаряжается через сопротивление  $R15$ . Образующееся на конденсаторе  $C4$  напряжение пилообразной формы подается на вход компаратора. В остальном работа фазовращателя не отличается от работы обычного импульсного фазовращателя (см. рис. 5.13).

На выходе компаратора (резистор  $R12$ ) формируются импульсы, передний фронт которых смещен относительно нуля напряжения сети на угол, пропорциональный выходному напряжению интегратора. После усиления транзистором  $VT4$  эти импульсы подаются на отпирание тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  модели машины. Импульсы для включения тиристоров силового контактора сварочной машины формируются усилителем на транзисторе  $VT6$ . Во время пауз вход этого усилителя шунтируется открытым до насыщения транзистором  $VT5$  и импульсы на выходе трансформатора  $T4$  отсутствуют.

Таким образом, во время пауз регулятор работает с моделью сварочной машины. При включении операции «сварка» от регулятора цикла сварки РЦС подается напряжение положительной полярности, длительностью  $t_{св}$ , которое возбуждает реле  $K2$  и запирает транзистор  $VT5$ . Реле  $K2$  переключает вход регулятора с модели на сварочную машину и сигнал, пропорциональный  $I_{св}$  или  $U_{эл}$ , поступает на входной трансформатор  $T2$ . После запирающего  $VT5$  с выхода усилителя  $VT6$  через обмотки  $II$  и  $III$  трансформатора  $T4$  импульсы поступают в схему управления тиристорным контактором сварочной машины. Угол включения тиристоров силового контактора зависит от напряжения рассогласования и будет изменяться до тех пор, пока величина рассогласования не сведется практически к нулю.

На транзисторе  $VT7$  собрана схема автоматического ограничения угла включения тиристоров, не зависящая от  $\cos \varphi$  сварочного контура. Она формирует импульсы положительной полярности, задний фронт которых совпадает с моментом выключения тиристоров в каждом полупериоде. Эти импульсы подаются

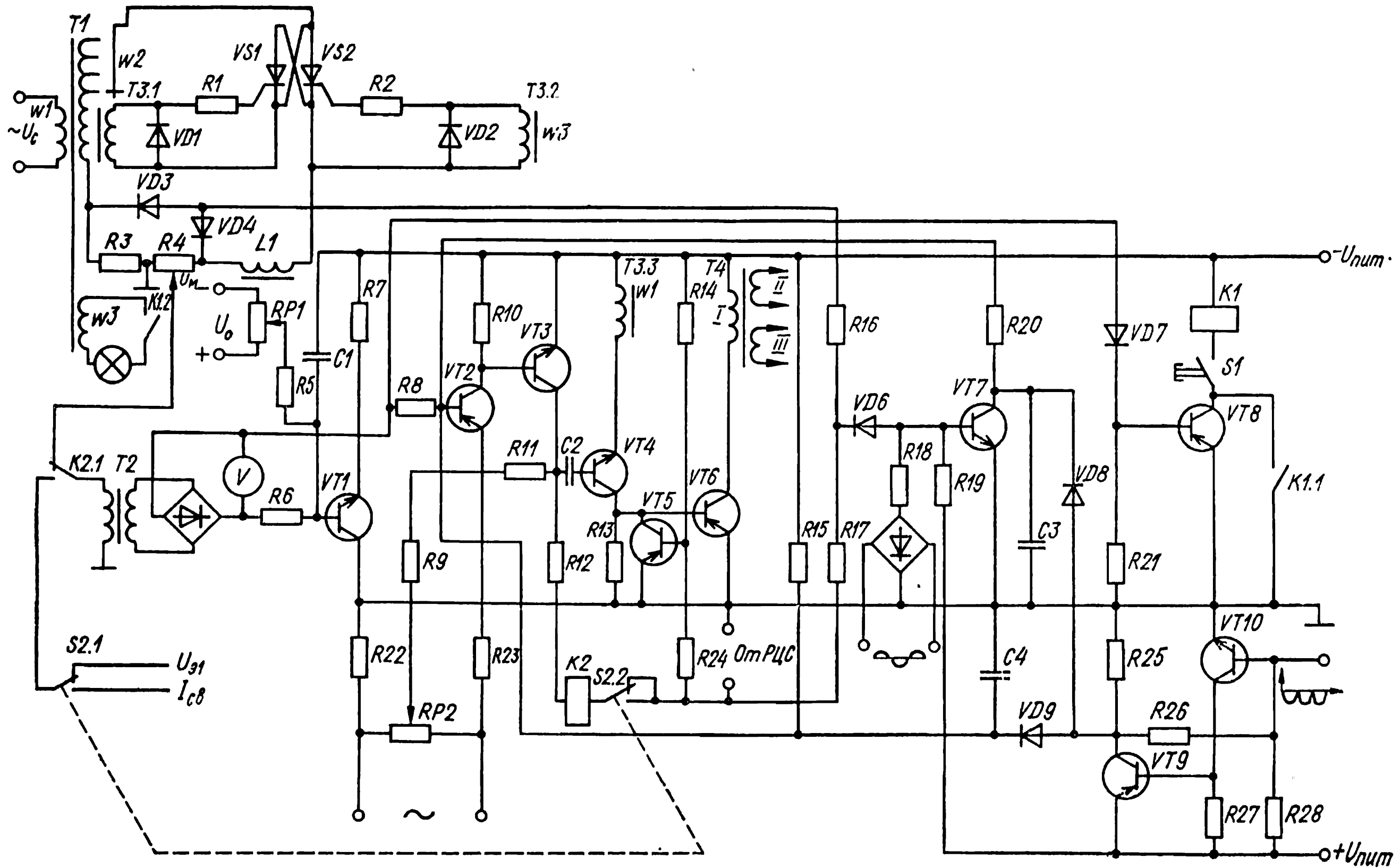


Рис. П.31. Схема универсального автоматического регулятора

на базу  $VT2$ , в результате чего при любом напряжении на выходе интегратора управляющее напряжение не может появиться раньше окончания предыдущего тока.

На транзисторе  $VT8$  собрана схема сигнализации полнофазного тока, а цепь  $R22, RP2, R23$  обеспечивает симметрию работы схемы и коррекцию постоянной составляющей тока в первичной обмотке трансформатора сварочной контактной машины.

Погрешность стабилизации параметра регулирования не превышает  $\pm 1\%$  при изменении этого параметра без регулятора на  $\pm 15\%$ . Время регулирования при скачкообразном изменении возмущений составляет  $0,02$  с.

## 20. Состав и работа принципиальной электрической схемы каналов прибора КОПР

Принципиальная электрическая схема одного из каналов КОПР, применяемого для контроля напряжения питания сварочного трансформатора  $T$ , показана на рис. П.32. Она состоит из разделительного трансформатора  $T1$ , выпрямителей  $VD1, VD2$  с фильтрами  $R1, C1, C2$ , двух дискриминаторов ( $DA1, DA2$ ) с задатчиками ( $RP1, RP2$ ) соответственно нижнего и верхнего уровня контролируемого напряжения, детекторов ( $VD3, VD4$ ), элементов логики формирования команд разрешения контроля ( $DD1$ ) и индикации ( $DD2$ , светодиоды  $VD5, VD6$ .)

В исходном состоянии к инверсным входам усилителей  $DA1$  и  $DA2$ , работающих в релейном режиме, приложено отрицательное напряжение, снимаемое с движков потенциометров  $RP1$  и  $RP2$ . На выходе усилителей будет положительное напряжение относительно общей точки, соответствующее сигналу логической «1». Цепи включения элементов индикации заблокированы сигналом логического «0» на входах  $DD2.1$  и  $DD2.2$ . При разрешении контроля напряжения на входы 5, 10 элемента  $DD1$  поступает сигнал логической «1». Если контролируемое напряжение меньше нижнего уровня, то на обоих входах элемента  $DD1.1$  будут сигналы логической «1», а на его выходе — «0», что приводит к включению элемента индикации  $VD5$ . При этом элемент  $VD6$  остается выключенным, так как сигнал «1» сохраняется на выходе усилителя  $DA2$ . Если контролируемое напряжение находится в пределах допуска, на выходе усилителя  $DA1$  напряжение будет соответствовать логическому «0», а на входе  $DD2.1$  — логической «1». Индикатор выключен. Аналогичным образом происходит включение элемента  $VD6$ , когда напряжение выше нормы.

Напряжение питания сварочного трансформатора контролируется с момента включения машины до поступления команды «пуск сварка». Для этих же целей могут быть использованы и другие устройства, выполненные на базе серийных трехпозиционных измерительных приборов, например, М303К, М1531К и других типов.

На рис. П.33 приведена электрическая схема канала обнаружения и контроля длительности кратковременных перерывов оплавления перед осадкой свариваемых деталей. Отсчет времени прерывания оплавления начинается в момент, когда частота пульсаций тока равна нулю, а отдельная информация о разрыве

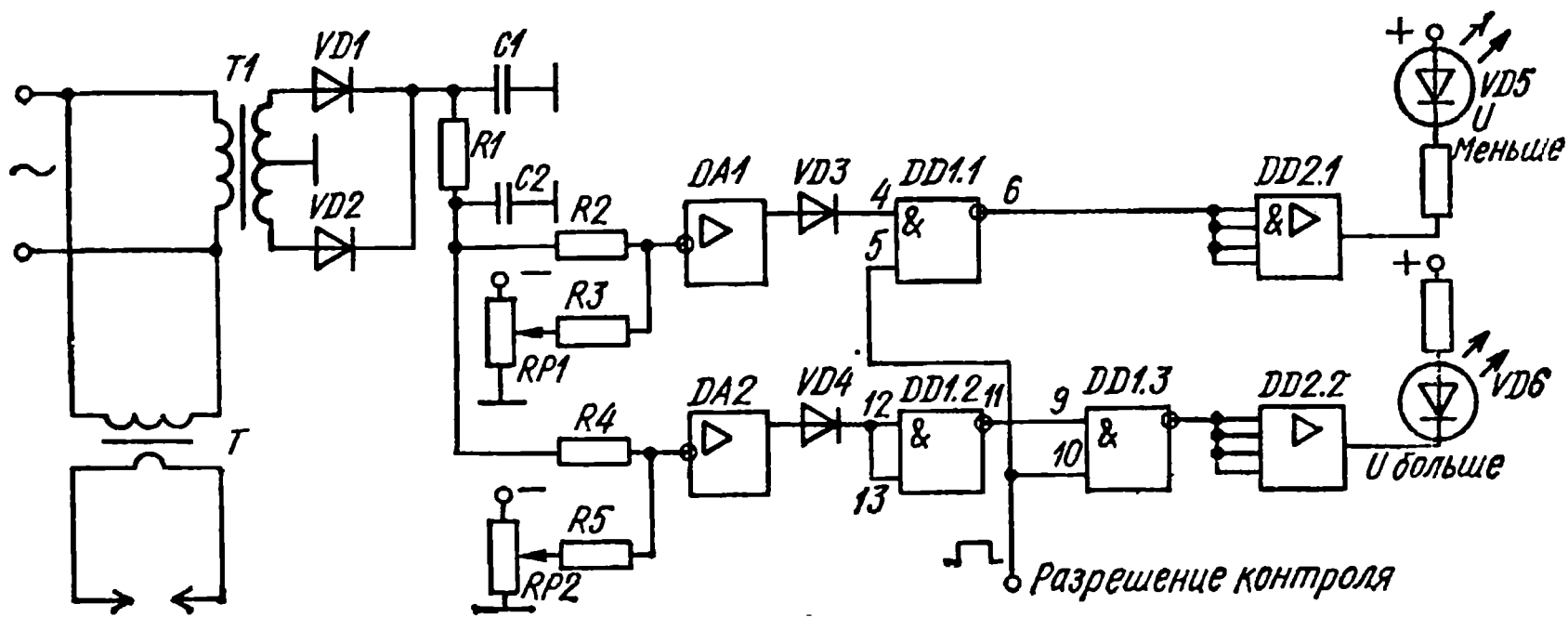


Рис. П.32. Принципиальная электрическая схема канала контроля напряжения сварочного трансформатора прибора КОПР

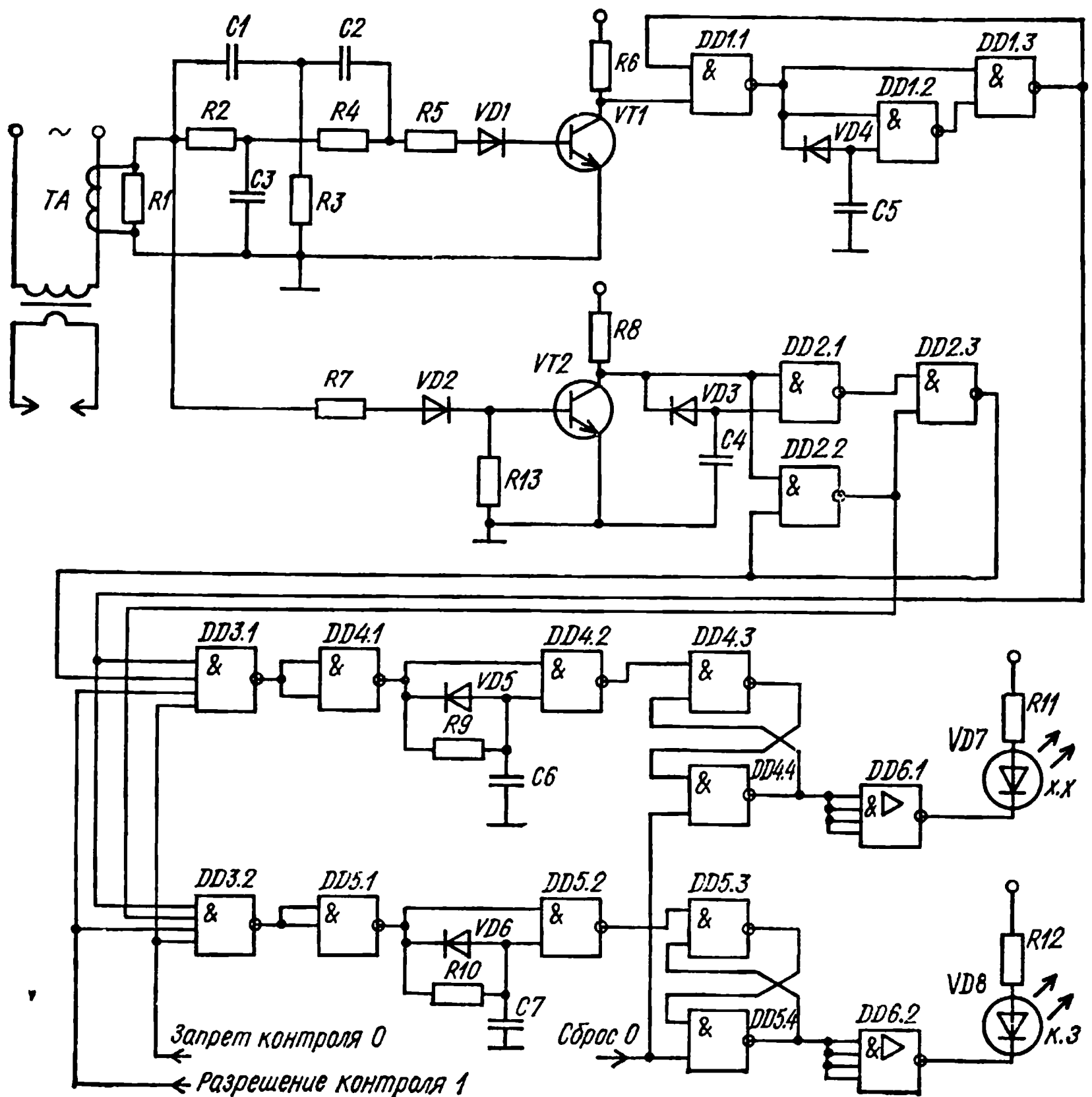


Рис. П.33. Принципиальная электрическая схема контроля длительности прерывания процесса оплавления перед осадкой

сварочной цепи (режим холостого хода (х.х)) или ее коротком замыкании (к. з.) определяется наличием в цепи тока.

С трансформатора тока  $TA$ , включенного в первичную цепь машины и зашунтированного сопротивлением  $R1$ , снимается пропорциональное мгновенному значению сварочного тока напряжение, которое поступает на входы датчиков частоты пульсаций и сварочного тока.

Датчик частоты содержит двойной Т-образный фильтр с большим затуханием для тока  $f = 50$  Гц, детектор  $VD1$ , усилитель на транзисторе  $VT1$  и одновибратор ( $DD1, VD4, C5$ ), преобразующий входной сигнал в последовательность импульсов постоянной длительности и амплитуды.

Датчик наличия сварочного тока содержит детектор  $VD2$ , усилитель на транзисторе  $VT2$ , элемент задержки сигнала на 10 мс (микросхема  $DD2.1, VD3, C4$ ) и  $R-S$  триггер ( $DD2.2, DD2.3$ ).

К выходу обоих датчиков подключены логический элемент определения короткого замыкания ( $DD3.2$ ), инвертор ( $DD5.1$ ), задатчик допустимой длительности короткого замыкания ( $VD6, R10, C7, DD5.2$ ), запоминающее устройство ( $DD5.3, DD5.4$ ) и элемент индикации ( $DD6.2, VD8$ ). Аналогичные функциональные схемы подключены к выходу обоих датчиков и по каналу измерения длительности разрыва сварочной цепи (режима х.х).

В исходном состоянии, когда нет тока и его пульсаций, усилители  $VT1, VT2$  закрыты, при этом на выходе элементов  $DD1.3$  и  $DD2.3$  будет сигнал логической «1», а на выходе  $DD2.2$  логического «0». Конденсаторы  $C7$  и  $C8$  разряжены сигналом



логического «0» на выходе соответственно элементов *DD4.1* и *DD5.1*. Команда разрешения контроля непрерывности оплавления перед осадкой (логическая «1») поступает на один из входов элементов *DD3.1* и *DD3.2*. При этом в режиме х.х. на всех входах элементов *DD3.1* будут сигналы «1», в режиме к.з. — такие же сигналы на входах *DD3.2*. Соответственно на выходе элемента *DD4.1* (или *DD5.1*) будет сигнал логической «1» и конденсатор *C7* (или *C6*) начнет заряжаться. Если длительность прерывания процесса оплавления превысит допустимую, то на втором входе элемента *DD4.2* (или *DD5.2*) появится сигнал «1», в результате чего триггер *DD4.3*, *DD4.4* (или *DD5.3*, *DD5.4*) изменяет свое состояние и включается соответствующий индикатор *VD7* или *VD8*. При подаче команды на включение осадки на соответствующий вход элемента *DD3* поступает сигнал логического «0», запрещающий контроль.

## 21. Устройство контроля отклонения величины осадки

Устройство (рис. П.34) содержит три идентичных измерительных канала: 1-й — для контроля отклонения припуска на осадку, независимо от причин, вызвавших отклонение; 2-й и 3-й каналы — для обнаружения проскальзывания деталей в соответствующих зажимах машины. Каждый из каналов состоит из последовательно соединенных блоков сравнения *DA1*, *DA2*, *DA3*, выполненных на усилителях постоянного тока, запоминающих устройств с элементами логики *DD3*, *DD4*, *DD5* и блоков индикации *DD6.2*, *V12*; *DD7.1*, *V13*; *DD7.2*, *V14*. Входные цепи устройства подключены к движкам линейных потенциометров датчика перемещения штока золотника следящей системы *ДШ* (см. рис. 5.52) и датчиков проскальзывания деталей *ДП1*, *ДП2* (см. рис. 5.51) в подвижном и неподвижном зажимах машин. С потенциометров *ДП1* и *ДП2* снимаются напряжения, про-

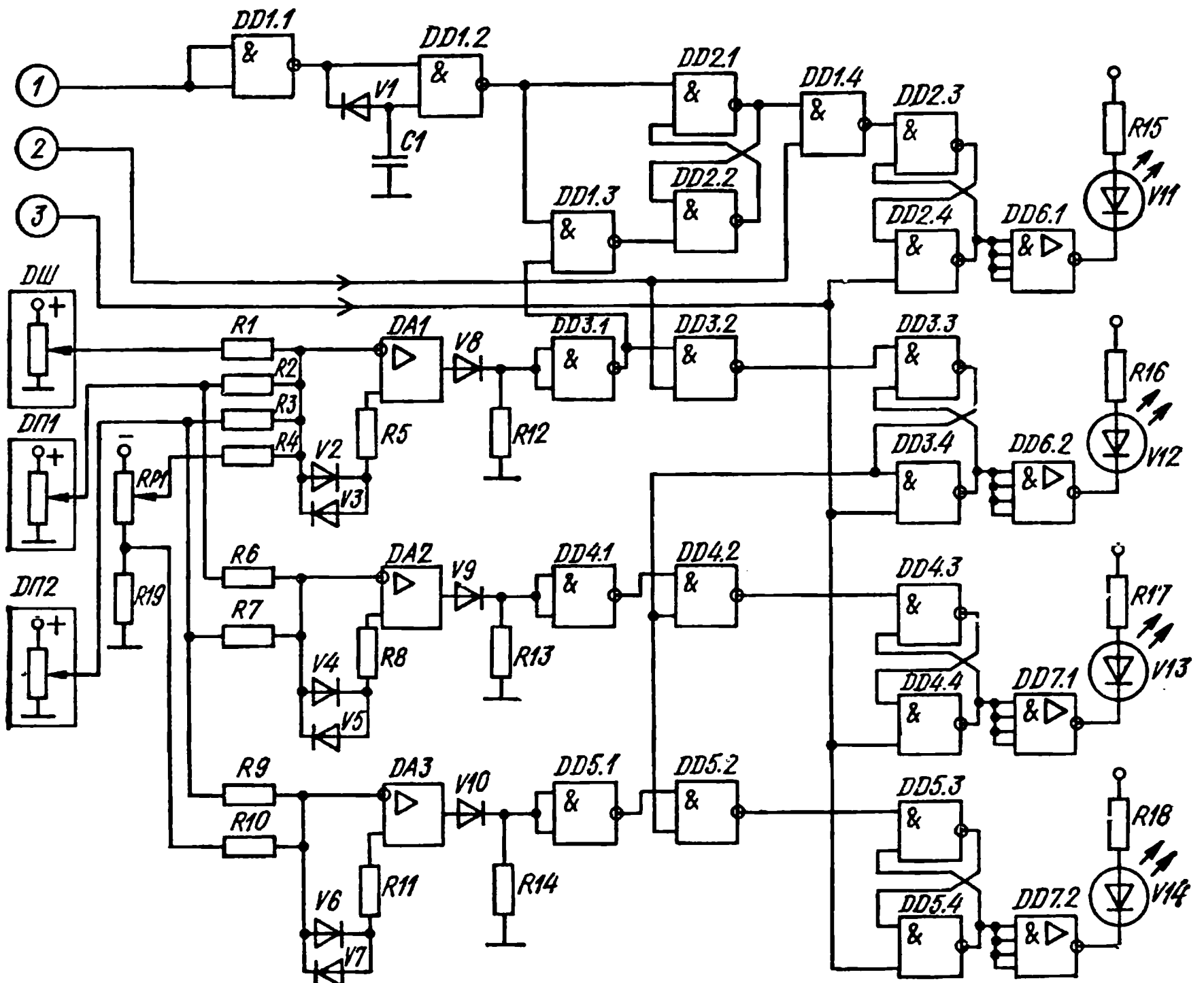


Рис. П.34. Принципиальная электрическая схема устройства контроля отклонения осадки: 1, 2 — подача сигналов «разрешение контроля» вылета штока и осадки соответственно; 3 — подача сигнала «сброс»

порциональные величинам контролируемых параметров, и сравниваются с напряжениями задатчиков  $RP1, R19$ .

При разрешении контроля осадки (вход 2) на один из входов элемента  $DD3.2$  поступает сигнал логической «1». Если сумма напряжений на входе усилителя  $D1$  превысит уставку, то на его выходе появится сигнал логического нуля. Такой же сигнал будет на входе триггера  $D3.3, D3.4$ , который, опрокидываясь, включит светодиод  $V12$  («отклонение осадки»).

Аналогичным образом производится включение светодиодов  $V13$  или  $V14$  в случае проскальзывания деталей в подвижном либо неподвижном зажимах соответственно. Сигнал разрешения контроля поступает на соответствующие входы элементов  $DD4.2$  и  $DD5.2$ , если отклонение припуска на осадку превышает заданное значение.

Поскольку в рассмотренной схеме измеряется не абсолютная величина контролируемого параметра, а его отклонение, то возможно возникновение ложной информации в случае, когда осадка по какой-либо причине не произошла. Для предотвращения этого случая схемой на элементах  $DD1$  и  $DD2$  дополнительно контролируется наличие осадки по вылету штока следящего золотника с помощью датчика  $ДШ$ .

В конечной стадии процесса по входу 1 на элемент  $DD1.1$  поступает команда «1» разрешения контроля вылета штока. При этом на одном из входов  $DD1.3$  появляется сигнал логической «1», но триггер  $DD2.1, DD2.2$  исходного состояния не изменяет. В момент осадки деталей с датчика  $ДШ$  на вход усилителя  $DA1$  подается импульс напряжения. При этом на выходе  $DD3.1$  и соответственно на другом входе  $DD1.3$  формируется сигнал логической «1». Триггер  $DD2.1, DD2.2$  изменяет исходное состояние (появляется «0» на выходе  $DD2.1$ ), благодаря чему с приходом команды разрешения контроля осадки на один из входов  $DD1.4$  триггер  $DD2.3, DD2.4$  не опрокидывается и светодиод  $V11$  остается включенным. Если же осадка не произошла (не было вылета штока следящего золотника), то триггер  $DD2.1, DD2.2$  не изменит своего состояния («1» на выходе  $DD2.1$ ). С приходом команды разрешения контроля включается светодиод  $V11$  («отсутствие осадки»).

## 22. Определение величины координатных коррекций сварочного инструмента

На рис. П.35,а приведена схема определения смещения твердого тела при его случайном малом повороте в пространстве и произвольном выборе положения базовых точек. Можно показать, что в этом случае для определения координатных коррекций необходимо и достаточно определить смещения шести базовых точек. Для подавляющего большинства деталей рационально использовать три точки для определения смещений по одной из координат, две — по второй и одну по третьей координате.

Определим вначале смещение по координате  $Z$  плоскости, проходящей через точки  $1_p, 2_p, 3_p$  после того, как эта плоскость в результате случайного поворота будет проходить через базовые точки  $1, 2, 3$ , т. е. найдем  $\Delta Z_1, \Delta Z_2$  и  $\Delta Z_3$ . Отложим перпендикулярно к плоскости  $XOY$  на прямых, представляющих собой продолжения направлений поиска базовых точек  $1, 2, 3$ , величины  $\Delta Z_1, \Delta Z_2, \Delta Z_3$ . Получим точки  $1^1, 2^1, 3^1$  (рис. П.35,а) с координатами  $(X_1, Y_1, \Delta Z_1), (X_2, Y_2, \Delta Z_2), (X_3, Y_3, \Delta Z_3)$ .

Уравнение плоскости, проходящей через точки  $1^1, 2^1, 3^1$ , имеет вид

$$\begin{vmatrix} V_1 \Delta Z_1 \\ V_2 \Delta Z_2 \\ V_3 \Delta Z_3 \end{vmatrix} X + \begin{vmatrix} \Delta Z_1 X_1 \\ \Delta Z_2 X_2 \\ \Delta Z_3 X_3 \end{vmatrix} Y + \begin{vmatrix} X_1 Y_1 \\ X_2 Y_2 \\ X_3 Y_3 \end{vmatrix} \Delta Z - \begin{vmatrix} X_1 Y_1 \Delta Z_1 \\ X_2 Y_2 \Delta Z_2 \\ X_3 Y_3 \Delta Z_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (14)$$

Объем, ограниченный плоскостями  $XOY$  (14) и цилиндрической поверхностью, перпендикулярной к плоскости  $XOY$ , с направляющей, представляющей собой проекцию программного положения тела на плоскость  $XOY$ , является эпюрой координатных коррекций  $\Delta Z$ , а соотношение (14) позволяет определить текущую величину  $\Delta Z$ .

Эпюру коррекций  $\Delta Y$  строим на плоскости  $XOZ$  и точках  $4^1, 5^1, 7^1$  с координатами:  $(X_4; \Delta Y_4; Z_4), (X_5; \Delta Y_5; Z_5), (X_{7^1}; \Delta Y_{7^1}; Z_{7^1})$ , а эпюру коррекций  $\Delta X$  —

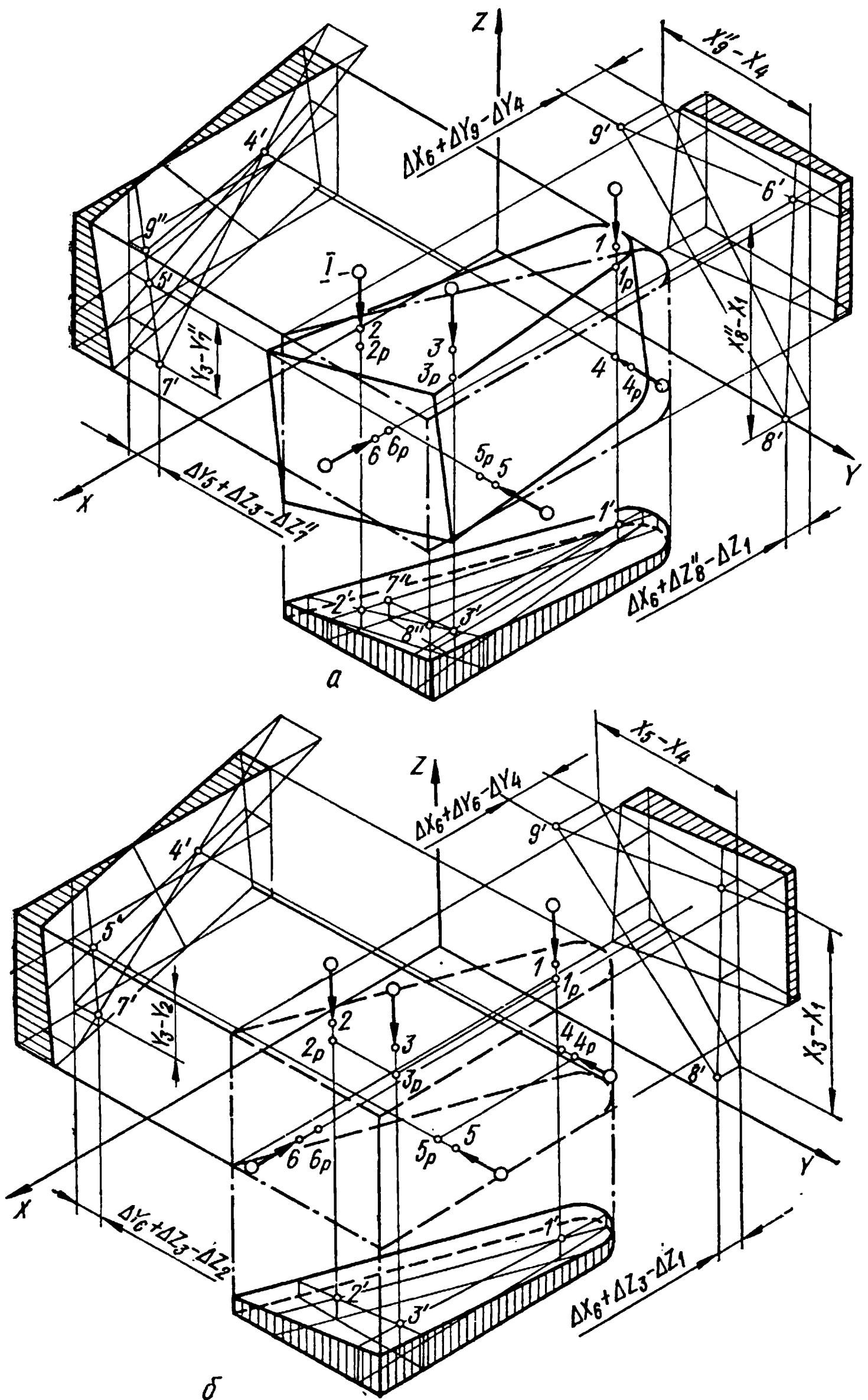


Рис. П.35. Определение положения шести базовых точек при произвольном случайном повороте элемента неизменной формы и размеров (трехмерная задача):

— — — — — программное положение элемента; — — — — — фактическое положение элемента; а — при произвольном расположении базовых точек; б — при упорядоченном расположении базовых точек;  $1_p, 2_p, 3_p, 4_p, 5_p, 6_p$  — программное положение базовых точек; 1, 2, 3, 4, 5, 6 — фактическое расположение базовых точек ( $1' - 9'$ ;  $7'' - 9''$  — точки, отстоящие от координатных плоскостей на величину отклонения одноименных базовых точек и определяющие эпюры коррекций;  $I$  — направления поиска базовых точек)

на плоскости  $YOZ$  и точках  $6^1, 8^1, 9^1$  с координатами:  $(\Delta X_6; Y_6; Z_6), (\Delta X_8; Y_8; Z_8), (\Delta X_9; Y_9; Z_9)$ . Координаты дополнительных точек  $7^1, 8^1, 9^1$  определяем через координаты точек  $1^1 - 6^1$  с учетом предположения о неизменности формы и размеров рассматриваемого тела:

$$X_{7'} = X_5; \Delta Y_{7'} = \Delta Y_5 + \Delta Z_3 - \Delta Z_{7''}; Z_{7'} = Z_5 - (Y_3 - Y_{7''}), \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta Z_{7''} &= \Delta Z_1 + \frac{\Delta Z_2 - \Delta Z_1}{X_2 - X_1} (X_3 - X_1); \\ Y_{7''} &= Y_1 + \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X_3 - X_1); X_{7''} = X_3; \\ \Delta X_{8'} &= \Delta X_6 + \Delta Z_{8''} - \Delta Z_1; Y_{8'} = Y_6; Z_{8'} = Z_6 - (X_{8''} - X_1), \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta Z_{8''} &= \Delta Z_2 + \frac{\Delta Z_3 - \Delta Z_2}{Y_3 - Y_2} (Y_1 - Y_2); \\ X_{8''} &= X_2 + \frac{X_3 - X_2}{Y_3 - Y_2} (Y_1 - Y_2); Y_{8''} = Y_1; \\ \Delta X_{9'} &= \Delta X_6 + \Delta Y_{9''} - \Delta Y_4; Y_{9'} = Y_6 - (X_{9''} - X_4); Z_{9'} = Z_6, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\Delta Y_{9''} = \Delta Y_5 + \frac{\Delta Y_5 - \Delta Y_{7'}}{Z_5 - Z_{7'}} (Z_4 - Z_5); X_{9''} = X_5; Z_{9''} = Z_4.$$

Уравнение для определения коррекций  $\Delta Y$  имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \Delta Y_4 Z_4 \\ \Delta Y_5 Z_5 \\ \Delta Y_7 Z_7 \end{vmatrix} X_1 + \begin{vmatrix} Z_4 X_4 \\ Z_5 X_5 \\ Z_7 X_7 \end{vmatrix} \Delta Y + \begin{vmatrix} X_4 \Delta Y_4 \\ X_5 \Delta Y_5 \\ X_7 \Delta Y_7 \end{vmatrix} Z - \begin{vmatrix} X_4 \Delta Y_4 Z_4 \\ X_5 \Delta Y_5 Z_5 \\ X_7 \Delta Y_7 Z_7 \end{vmatrix} = 0, \quad (18)$$

где  $X_{7'}, \Delta Y_{7'}, Z_{7'}$  определяются из соотношений (15).

Уравнение для определения коррекций  $\Delta X$  имеет вид:

$$\begin{vmatrix} Y_6 Z_6 \\ Y_8 Z_8 \\ Y_9 Z_9 \end{vmatrix} \Delta X + \begin{vmatrix} Z_6 \Delta X_6 \\ Z_8 \Delta X_8 \\ Z_9 \Delta X_9 \end{vmatrix} Y + \begin{vmatrix} \Delta X_6 Y_6 \\ \Delta X_8 Y_8 \\ \Delta X_9 Y_9 \end{vmatrix} Z - \begin{vmatrix} \Delta X_6 Y_6 Z_6 \\ \Delta X_8 Y_8 Z_8 \\ \Delta X_9 Y_9 Z_9 \end{vmatrix} = 0, \quad (19)$$

где  $\Delta X_{8'}, Y_{8'}, Z_{8'}$  и  $\Delta X_{9'}, Y_{9'}, Z_{9'}$  определяются из соотношений (3), (4).

Вид уравнений для нахождения коррекций существенно упрощается, если базовые точки расположить в определенном порядке. Например, если точки 1 и 3 находятся на одинаковом расстоянии от плоскости  $XOZ$ , точки 2 и 3 — от плоскости  $YOZ$ , точки 4 и 5 — от плоскости  $XOY$  (рис. П35,б), то

$$Y_1 = Y_3; X_2 = X_3; Z_4 = Z_5 \quad (20)$$

и

$$\Delta Y_{9''} = \Delta Y_5; \Delta Z_{7''} = \Delta Z_2; \Delta Z_{8'} = \Delta Z_3. \quad (21)$$

Тогда, записав уравнения (14), (18) и (19) с учетом соотношений (20) и раскрыв определители, получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z &= (Y - Y_2) \operatorname{tg} \alpha_X + (X - X_1) \operatorname{tg} \alpha_Y + \Delta Z_1 + \Delta Z_2 - \Delta Z_3; \\ \Delta Y &= (X - X_4) \operatorname{tg} \alpha_Z - (Z - Z_5) \operatorname{tg} \alpha_X + \Delta Y_4; \\ \Delta X &= -(Z - Z_6) \operatorname{tg} \alpha_Y - (Y - Y_6) \operatorname{tg} \alpha_Z + \Delta X_6, \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha_X = \frac{\Delta Z_3 - \Delta Z_2}{Y_3 - Y_2}; \operatorname{tg} \alpha_Y = \frac{\Delta Z_3 - \Delta Z_1}{X_3 - X_1}; \operatorname{tg} \alpha_Z = \frac{\Delta Y_5 - \Delta Y_4}{X_5 - X_4}.$$

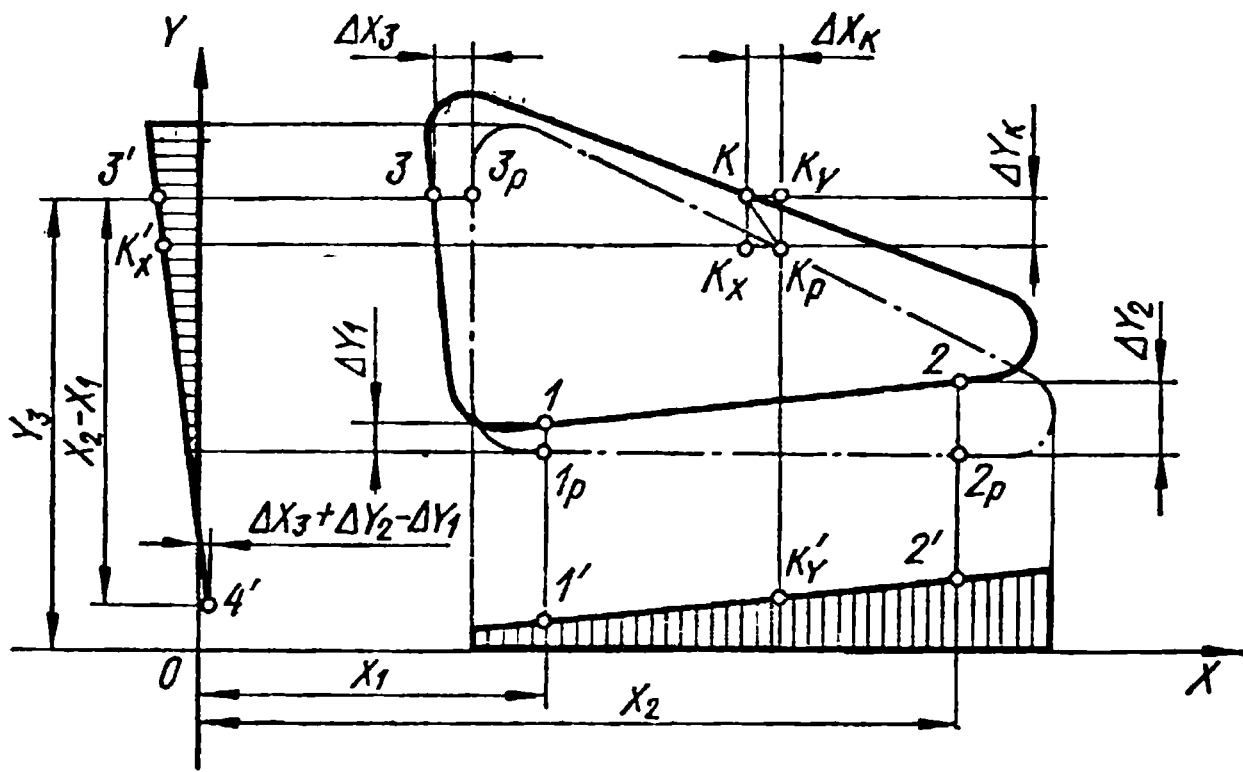


Рис. П.36. Определение положения трех базовых точек при произвольном случайном повороте плоского элемента неизменной формы и размеров (двухмерная задача):

— · — · — программное положение контура элемента; — — — фактическое положение контура элемента;  $1_p, 2_p, 3_p$  — программное положение базовых точек;  $1, 2, 3$  — фактическое положение базовых точек;  $1'—4'$  — точки, отстоящие от координатных осей на величину отклонения одноименных базовых точек и определяющие эпюры коррекций

Уравнения (14), (18), (19) либо уравнения (22) позволяют определить коррекции по координатам  $X, Y, Z$  для любой точки рассматриваемого тела. Исходными данными для вычисления поправок являются смещения шести базовых точек:  $\Delta Z_1, \Delta Z_2, \Delta Z_3, \Delta Y_4, \Delta Y_5, \Delta X_6$ . Значения  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, Y_1, Y_2, Y_3, Y_6, Z_4, Z_5, Z_6$ , характеризующие положение линий поиска, постоянны для всех экземпляров и вводятся в память системы один раз — при переналадке на новый типоразмер изделия.

Можно показать, что в случае «плоской» задачи для учета случайного поворота достаточно измерить смещения только трех точек (рис. П.36).

Определим смещение по координате  $Y$  прямой, проходящей через точки  $1_p$  и  $2_p$  после того, как она, в результате случайного поворота, стала проходить через точки  $1$  и  $2$ .

Отложим от оси  $X$  на прямых, представляющих собой направления поиска базовых точек  $1$  и  $2$ , величины  $\Delta Y_1$  и  $\Delta Y_2$ . Получим точки  $1'$  и  $2'$  с координатами  $(X_1; \Delta Y_1)$  и  $(X_2; \Delta Y_2)$ .

Уравнение прямой, проходящей через точки  $1'$  и  $2'$ , имеет вид

$$\frac{\Delta Y - \Delta Y_1}{\Delta Y_2 - \Delta Y_1} = \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \quad \text{или} \quad \Delta Y = (X - X_1) \operatorname{tg} \alpha + \Delta Y_1, \quad (23)$$

где  $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\Delta Y_2 - \Delta Y_1}{X_2 - X_1}$  — угол наклона прямой, проходящей через точки  $1'$  и  $2'$ , к оси  $X$ ;  $\alpha = \operatorname{const}$  для данного экземпляра изделия.

Плоская фигура, ограниченная осью  $X$ , прямой (23) и ординатами  $X_{p.\min}$  и  $X_{p.\max}$  (где  $X_p$  — программное значение координаты  $X$  для точек рассматриваемой фигуры), представляет собой эпюру координатных коррекций  $\Delta Y$ , а соотношение (23) можно использовать для определения текущей величины  $\Delta Y$ . Эпюру коррекций  $\Delta X$  строим на оси  $Y$  по точкам  $3'$  и  $4'$  с координатами  $(\Delta X_3; Y)$  и  $(\Delta X_4; Y_4)$ . Координаты дополнительной точки  $4'$  определяются через координаты точек  $1', 2', 3'$  на основании предложения о неизменности формы и размеров рассматриваемой фигуры:

$$\Delta X_4 = \Delta X_3 + \Delta Y_2 - \Delta Y_1; \quad Y_4 = Y_3 - (X_2 - X_1). \quad (24)$$

Уравнение прямой, проходящей через точки  $3'$  и  $4'$ , с учетом соотношений (11) имеет вид

$$\Delta X = -(Y - Y_a) \operatorname{tg} \alpha + \Delta X_3. \quad (25)$$

Фактическое смещение любой точки, лежащей в области, которая ограничена рассматриваемой фигурой, равно геометрической сумме коррекций  $\Delta X$  и  $\Delta Y$ , определенных для программных значений  $X$  и  $Y$  этой точки из эпюр коррекций или из уравнений (23) и (25). Например, для точки  $K_p$  (рис. П.36) коррекции равны  $\Delta X_k$  и  $\Delta Y_k$ , а фактическое ее положение соответствует точке  $K$ .

Итак, для плоской задачи с целью определения фактического положения всех точек каждого экземпляра изделия данного типоразмера достаточно определить значения смещений трех базовых точек, т. е. величины  $\Delta Y_1$ ,  $\Delta Y_2$ ,  $\Delta X_3$ . Значения  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_3$ , характеризующие положение линий поиска, постоянны для всех экземпляров изделия и вводятся в память системы один раз — при переналадке на новый типоразмер изделия.

Результаты измерений отклонения базовых точек можно использовать не только для вычисления коррекций  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ , но и для компенсирующего поворота изделия либо координатной системы манипулятора сварочного инструмента. В этом случае для определения требуемого угла компенсирующего поворота, например при плоской задаче, достаточно всего двух базовых точек. Поскольку компенсирующий поворот изделия или координатной системы манипулятора инструмента может производиться только вокруг определенных осей, а случайный поворот изделия возможен вокруг любых осей, то после такой компенсации случайного поворота возникает необходимость компенсации параллельного переноса.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация электронно-лучевой сварки корпусов реле / Н. Ф. Киселевский, Л. И. Костенко, В. А. Васильев и др. // Сварочное пр-во.— 1973.— № 5.— С. 18—20.
2. Анкутдинов Р. Б. Частотно-регулируемые асинхронные приводы исполнительных устройств роботов и манипуляторов // Системы управления электромеханическими исполнительными устройствами роботов и манипуляторов.— Л., 1980.— С. 34—37.
3. Вайнер Ш. А., Вайнер С. А. Фотоэлектронные системы управления.— М.: Машиностроение, 1980.— 205 с.
4. Воронин Ф. В., Шаринов В. И. Электромагнитная совместимость сварочного и телевизионного оборудования. Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка.— 1974.— № 1 (22) — С. 19—21.
5. Гаген Ю. Г., Таран В. Д. Сварка магнитоуправляемой дугой.— М.: Машиностроение, 1970.— 160 с.
6. Гельман А. С. Основы сварки давлением.— М.: Машиностроение, 1970.— 312 с.
7. Глебов Л. В., Пескарев Н. А., Файгенбаум Д. С. Расчет и конструирование машин контактной сварки.— Л.: Энергия, 1981.— 424 с.
8. Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин Г. И., Оптимизация режима сварки угловых швов и  $CO_2$  в различных пространственных положениях // Автомат. сварка.— 1982.— № 5.— С. 34—38.
9. Исследования околодугового пространства для создания датчиков положения стыка / В. Г. Котова, А. К. Галицкий, Ю. П. Голин и др. // Сварочное пр-во,— 1975.— № 12.— С. 45—47
10. Киселевский Ф. Н., Тertyшный В. Г., Швидкий Н. Р. Системы управления робототехническими комплексами для дуговой сварки.— К.: О-во «Знание» УССР, 1983.— 20 с.— (Сер. Наука, техника, передовой произв. опыт).
11. Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением.— К.: Наук. думка, 1976.— 214 с.
12. Ланкин Ю. Н., Байштрук Е. Н. Стабилизация удельной мощности пучка при электронно-лучевой сварке // Автомат. сварка.— 1976.— № 5.— С. 70—71.
13. Лебедев А. В. Структурная схема процесса саморегулирования дуги при переносе металла с короткими замыканиями // Автомат. сварка.— 1978.— № 5.— С. 7—12.
14. Лебедев А. В., Супрун С. А. Выбор привода подачи электродной проволоки полуавтомата для дуговой сварки // Автомат. сварка.— 1977.— № 3.— С. 4—8.
15. Львов Н. С., Гладков Э. А. Автоматика и автоматизация сварочных процессов.— М.: Машиностроение, 1982.— 302 с.
16. Львов Н. С. Автоматизация контроля и регулирования сварочных процессов.— М.: Машиностроение, 1973.— 128 с.

17. М а л и н к и н И. В., Ч е р н ы ш В. П. Настройка заданного сварочного режима при использовании автоматов с независимой скоростью подачи электродной проволоки // Вестн. Киев. политехн. ин-та, Машиностроение.— 1972.— № 9.— С. 48—51.

18. М а с л о в В. А. Сенсорная и адаптивная системы промышленных роботов и робототехнических комплексов. М.: НИИмаш. 1983.— 48 с.

19. М а ч у л и н В. В., Я к о в л е в Н. М. Привод манипуляционного робота с симметричным управляемым двухфазным двигателем // Системы управления электромеханическими исполнительными устройствами роботов и манипуляторов.— Л., 1980.— С. 38—41.

20. М е л ь н и к о в Н. В., С а ф о н о в Ю. М. Электропривод роботов // Электропривод и автоматизация пром. установок. Итоги науки и техники.— М., 1983.— С. 8—80.

21. Н и к о л а е в Г. А., К у р к и н С. А., В и н о к у р о в В. А. Сварные конструкции: Технология изготовления, автоматизация пр-ва и проектирование сварных конструкций.— М.: Высш. шк., 1983.— 344 с.

22. Оборудование для электронно-лучевой сварки / А. И. Четверо, О. К. Назаренко, А. М. Святский, А. И. Некрасов — К.: Наук. думка, 1973.— 408 с.

23. П а т о н Б. Е. Проблемы комплексной автоматизации сварочного производства.: Докл. на междунар. семинаре по автоматизации сварочного пр-ва.— К., 1980.— 11 с.

24. П а т о н Б. Е., Л е б е д е в В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки.— М.: Машиностроение, 1966.— 359 с.

25. П а т о н Б. Е., С л ы н у Г. А., Т и м о ш е н к о В. Г. Промышленные роботы для сварки.— К.: Изд. думка, 1977.— 227 с.

26. П а т о н Б. Е. Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом.— Автомат. сварка.— 1952.— № 1.— С. 38—45.

27. П о д о л а Н. В., К в а ч е в В. Г., У р с а т ь е в А. А. Оценка влияния параметров режима на размеры ядра при точечной сварке // Автомат. сварка.— 1970.— № 11.— С. 24—27.

28. П о д о л а Н. В., К р и в о н о с В. П., Г р а б ч е в Б. Л. Новая система управления машиной К-190П для стыковой сварки рельсов // Автомат. сварка — 1983.— № 8.— С. 38—42.

29. П о т а п ь е в с к и й А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом.— М.: Машиностроение, 1974.— 239 с.

30. Применение телевизионных установок ПТУ-37 в станах для сварки внутренних швов на трубах / В. А. Тимченко, Н. И. Усик, В. К. Долиненко и др. // Автомат. сварка.— 1977.— № 4.— С. 62—64.

31. Прогнозирование качества соединений, выполняемых контактной микро-сваркой / Н. В. Подола, В. Э. Моравский, Д. С. Ворона и др. // Автомат. сварка.— 1980.— № 12.— С. 35—38.

32. Промышленная робототехника / Под ред. Я. А. Шифрина.— М.: Машиностроение, 1982.— 415 с.

33. Р а б и н о в и ч И. Я. Некоторые вопросы теории устойчивости источников питания и систем регулирования дуговой сварки // Новые пробл. сварочной техники: Сб.— К.,— 1964.— С. 384—397.

34. Р ы к а л и н Н. Н., З у е в И. В., У г л о в А. А. Основа электронно-лучевой обработки материалов.— М.: Машиностроение, 1978.— 239 с.

35. С а м о ф а л о в К. Г., К о р н е й ч у к В. И., Т а р а с е н к о В. П. Цифровые электронные вычислительные машины.— 2-е изд., перераб. и доп.— К.: Вища шк., Головное изд-во 1983.— 455 с.

36. С о б о т к а З., С т а р ы Я. Микропроцессорные системы / Под ред. В. В. Сташина; Пер. с чеш — М.: Энергоатомиздат, 1981.— 494 с.
37. Сварка многослойных кольцевых швов толстостенных изделий с применением системы автоматического управления / В. А. Тимченко, Е. Ф. Маличенко, В. Д. Иваненко и др. // Автомат. сварка.— 1975.— № 2.— С. 106—111.
38. Сварка с электромагнитным перемешиванием / Под ред. В. П. Черныша.— К.: Техніка, 1983.— 128 с.
39. Сварка в СССР. Т. 1. Развитие сварочной техники и науки о сварке: Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование / Редкол.: В. А. Винокуров (отв. ред.), Ю. А. Анисимов, И. А. Антонов и др.— М.: Наука, 1981.— 533 с.
40. С е в б о П. И. Комплексная механизация и автоматизация сварочного производства.— К.: Техніка, 1977.— 416 с.
41. С е р г а ц к и й Г. И., Д у б о в е ц к и й С. В., К а с а т к и н О. Г. Модели для разомкнутого управления формированием шва при сварке в  $CO_2$  // Автомат. сварка.— 1983.— № 2.— С. 22—26
42. Система автоматического регулирования вылета электрода трактора АДПГ-500 / Ю. Н. Кутепов, Д. С. Кассов, Ю. И. Рейдерман, А. И. Михеев // Сварочное пр-во.— 1968.— № 12.— С. 39—40.
43. С к у р и х и н В. И., М а к а р о в Г. Т., У р с а т ь е в А. А. «Сварог» — устройство контроля качества контактной точечной сварки // Упр. системы и машины.— 1976.— № 5.— С. 129—133.
44. Слежение по стыку с помощью телевизионной системы при электронно-лучевой сварке / Г. Д. Никифоров, М. П. Лившиц, В. Г. Лазарев и др. // Сварочное пр-во.— 1972.— № 9.— С. 18—19.
45. Следящая система УСО // Сварочное пр-во.— 1971.— № 7.— С. 58.
46. Современные вторично-эмиссионные системы автоматического направления пучка электронов по стыку при сварке / Г. А. Спыну, Ю. И. Пастушенко, В. Е. Локшин и др. // Автомат. сварка.— 1978.— № 10.— С. 18—22.
47. С р и б н е р Л. А., Ш р а г о Л. К. Проектирование позиционных систем программного управления.— М.; К.: Машгиз, 1962.— 308 с.
48. Технические средства автоматического направления сварочного инструмента на линию соединения / В. А. Тимченко, Н. И. Усик, Е. Ф. Маличенко и др. // Автомат. сварка.— 1977.— № 9.— С. 53—57.
49. Т и м ч е н к о В. А., Н а ч е в Г. Состояние и тенденции развития роботов для сварки // Автомат. сварка.— 1982.— № 7.— С. 45—58.
50. Т р а х т е н б е р г Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением.— М.: Энергоиздат, 1982.— 169 с.
51. Т р о ф и м о в Н. М., Р о щ и н М. Б., В о р о н о в Н. Ф. Аппаратура для непрерывного измерения зазора и скорости электрошлаковой сварки // Сварочное пр-во.— 1982.— № 11.— С. 30—31.
52. Установка с программным управлением для сварки толстостенных кольцевых соединений / Б. С. Касаткин, И. В. Нетеса, Е. Ф. Маличенко и др. // Вестн. машиностроения.— 1969.— № 1.— С. 48—50.
53. Ч в е р т к о А. И., П а т о н Б. Е., Т и м ч е н к о В. А. Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки.— М.: Машиностроение, 1981.— 264 с.
54. Ш и р о к о в с к и й Р. М., П а ч е н ц е в Ю. А., Ш и г е л ь с к и й В. М. Фотоэлектрический датчик системы автоматического направления электрода дуговой установки по стыку // Автомат. сварка.— 1967.— № 9.— С. 53—56.

55. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под. ред. Б. Е. Патона.— М.: Машиностроение, 1980.— 511 с.

56. Ю р е в и ч Е. И. Электромеханические системы промышленных роботов // Системы управления электромеханическими исполнительными устройствами роботов и манипуляторов.— Л., 1980.— С. 8—11.

57. Я к у б а й т и с Э. А. Синтез асинхронных конечных автоматов.— Рига : Зинатне, 1970.— 326 с.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

- Автоматическое направление по стыку
  - электрода 23, 65
  - электронного луча 140
- Алгоритм функционирования 39
- Аппаратура контроля
  - с калькулятором 179
  - с микроЭВМ 180
  - со специализированным процессором 177

### В

- Воздействия
  - возмущающие 116
  - регулирующие 92, 116
- Возмущения 8, 21, 60, 93, 149, 188
- Видеосенсор 74

### Д

- Датчик
  - времени (длительности) 204
  - вторичной эмиссии 141
  - длительности осадки 207
  - зазора 107
  - индуктивный 171, 203
  - индукционный 103
  - контактные 101, 150
  - перемещения 171, 206
  - пневматический 56, 79
  - потенциометрический 107
  - проскальзывания 205
  - радиоактивный 102
  - реостатный 203
  - рентгеновского излучения 137
  - сварочного зазора 107
  - сварочного тока 166
  - скорости 203
  - с кольцевым щупом 230
  - температуры 101, 149
  - тока 166
  - уровня (сварочной ванны) 101
  - фотоэлектрический 264
  - электромагнитные 77, 205, 232
  - электромеханический 229, 263
  - электроразрядный 75, 267
- Дозирование материалов 94, 113

### И

- Идентификация объектов 10
- Системы
  - замкнутые 13

- компенсации 13, 155
- разомкнутые 12
- регулирования 13, 14, 15
- следящие 15, 64, 139, 264, 266, 267
- стабилизации 14
- Системы управления
  - адаптивные 15, 81
  - информационные 19, 108
  - качеством сварных швов 90, 136
  - кинематического 24
  - контурные 23, 30, 211
  - позиционные 23, 29, 211
  - положением горелки 65
  - программные 12, 154, 190, 191
  - свободнопрограммируемые 18, 42
  - числового программного (ЧПУ) 29
- Средства роботизации 211

### К

- Качество сварных соединений 22, 91, 107, 116, 136, 147, 174, 202
- Контактор тиристорный 96, 157, 270
- Корректоры
  - напряжения 199
  - скорости 196

### М

- Манипуляторы 214, 219
- Математические модели 11, 61, 82, 117, 173
- Механизм дифференциальный 253
- Модулятор 159

### О

- Объекты
  - регулирования 12, 21, 166
  - роботизации 233
  - управления 7, 10, 21, 87, 93, 116, 147, 181

### П

- Приводы
  - манипуляционных систем 221
  - с цифровым управлением 251
  - с шаговым двигателем 250

### Р

- Регулирование
  - глубины проплавления 62, 137

- по возмущению 96, 155
- программное 14
- уровня ванны 100, 270
- Регуляторы
  - локальные 14, 20, 120, 126, 153
  - мощности 130, 169
  - напряжения 51, 96, 98, 126, 169, 198, 260
  - непрямого действия 69
  - ИК-излучения 170
  - перемещения электродов 171
  - прямого действия 67, 69
  - сопротивления 172
  - температуры 170
  - тока 55, 99, 127, 134, 168
  - цикла (времени) сварки 158, 161, 163, 271
  - энергии 170
- Роботы 211, 222, 226
- Робототехнологические комплексы (РТК) 211, 224, 236, 238

## С

- Самовыравнивание (саморегулирование)
  - дуги 43, 51, 56, 257
  - процесса оплавления 184
  - процесса ЭШС 94

## Т

- Тепловизор 260

## У

- Управление
  - адаптивное 15, 81, 142
  - качеством 90, 136
  - оптимальное 173
  - программное 12, 23, 37, 133, 213, 254
  - с использованием ЭВМ 18, 198, 142, 180, 256
  - «Советчик оператора» 19
  - супервизорное 20, 142
  - цифровое 20, 143, 193, 208
- Устройство
  - исполнительное 16, 155, 166
  - контроля 176, 278, 280
  - копирующее 68, 252
  - программное 12, 134, 160, 192, 194, 254
  - управления 16, 142

## Ф

- Фазовращатели 160, 274

## Э

- Электропривод 16, 221, 242
  - переменного тока 249
  - постоянного тока 242
  - с широтно-импульсной модуляцией 246
  - с цифровым управлением 56
  - шаговый 250



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
1. Общие вопросы автоматизации сварочных процессов . . . . .	5
1.1. Автоматизация сварочных процессов как часть комплексной автоматизации сварочного производства . . . . .	5
1.2. Технологические процессы сварки как объекты автоматического управления. Способы их описания . . . . .	7
1.3. Современные системы и средства автоматического управления. Области их применения при сварке . . . . .	12
2. Автоматизация дуговой сварки . . . . .	21
2.1. Характеристика объекта управления . . . . .	21
2.2. Программное управление перемещениями рабочих органов сварочного оборудования . . . . .	23
2.3. Системы программного управления сварочными циклами . . . . .	37
2.4. Саморегулирование дуги с плавящимся электродом . . . . .	43
2.5. Системы автоматического регулирования дуговой сварки . . . . .	51
2.6. Системы управления формированием и геометрическими размерами швов . . . . .	60
2.7. Автоматизация управления положением сварочной горелки при сварке и наплавке . . . . .	64
2.8. Адаптивные системы управления дуговой сваркой . . . . .	80
2.9. Управление переносом электродного металла . . . . .	82
2.10. Системы магнитного управления формированием и кристаллизацией сварных швов . . . . .	86
3. Автоматизация электрошлаковой сварки . . . . .	91
3.1. Электрошлаковый процесс как объект управления. Классификация систем регулирования . . . . .	91
3.2. Системы регулирования тока и напряжения . . . . .	94
3.3. Регулирование уровня металлической и шлаковой ванн . . . . .	100
3.4. Регулирование режима электрошлаковой сварки в функции сварочного вазора . . . . .	106
3.5. Информационно-измерительные системы параметров процесса электрошлаковой сварки . . . . .	108
3.6. Современные способы и устройства для управления процессом электрошлаковой сварки . . . . .	110
4. Автоматизация электронно-лучевой сварки. . . . .	116
4.1. Характеристики объекта управления. . . . .	116
4.2. Требования к свойствам локальных регуляторов параметров режима электронно-лучевой сварки . . . . .	120
4.3. Типовые локальные регуляторы параметров режима электронно-лучевой сварки . . . . .	126

4.4. Программное управление параметрами режима электронно-лучевой сварки . . . . .	133
4.5. Автоматическое управление качеством сварного шва . . . . .	136
4.6. Системы наведения и автоматического направления электронного луча по стыку свариваемых кромок . . . . .	138
4.7. Применение ЭВМ для управления процессом электронно-лучевой сварки . . . . .	142
<b>5. Автоматизация контактной сварки . . . . .</b>	<b>147</b>
5.1. Контактная точечная (шовная) сварка как объект автоматического управления . . . . .	147
5.2. Состав и основные устройства систем автоматического управления процессом точечной и шовной сварки . . . . .	154
5.3. Типовые регуляторы времени и циклов сварки . . . . .	161
5.4. Автоматическое регулирование процессов точечной и шовной сварки	166
5.5. Управление и контроль процесса точечной сварки по математическим моделям . . . . .	173
5.6. Контактная стыковая сварка как объект управления и задачи ее автоматизации . . . . .	181
5.7. Автоматическое управление предварительным подогревом при стыковой сварке . . . . .	188
5.8. Программное управление процессом оплавления . . . . .	191
5.9. Автоматизация контроля параметров режима стыковой сварки . . . . .	202
<b>6. Промышленные роботы для автоматизации процессов сварки . . . . .</b>	<b>211</b>
6.1. Функции роботов и их состав . . . . .	211
6.2. Манипуляторы роботов . . . . .	213
6.3. Основные принципы управления роботами для сварки . . . . .	222
6.4. Методы и технические средства адаптации роботов для сварки . . . . .	226
6.5. Особенности использования роботов для автоматизации сварочных процессов . . . . .	233
<b>П р и л о ж е н и я . . . . .</b>	<b>242</b>
1. Управляемый электропривод систем автоматики сварочных установок	242
2. Однокоординатные системы копирования . . . . .	252
3. Блок программного управления полуавтоматом для дуговой сварки . . . . .	254
4. Функциональная схема универсальной системы управления на основе микропроцессорного устройства . . . . .	256
5. Определение передаточной функции системы саморегулирования дуги с плавящимся электродом . . . . .	257
6. Стабилизация сварочного тока в выпрямителе ВДУ-504 . . . . .	258
7. Система АРНД при сварке неплавящимся электродом с регулированием величины его погружения в металл и стабилизацией расстояния «сопло—металл» . . . . .	260
8. Устройство и принцип действия тепловизора . . . . .	260
9. Определение погрешности положения шва относительно линии стыка свариваемых кромок . . . . .	261
10. Электромеханические датчики систем автоматического направления сварочной горелки по стыку . . . . .	263
11. Системы слежения за стыком с фотоэлектрическим датчиком . . . . .	264
12. Телевизионная следящая система времяимпульсного типа . . . . .	266
13. Система слежения за стыком с магнитным отклонением дуги . . . . .	267
14. Однофазный тиристорный прерыватель для ЭШС . . . . .	268
15. Система автоматического регулирования тока ЭШП . . . . .	269
16. Регулятор уровня жидкого металла ванны при ЭШС . . . . .	270
17. Основные технические характеристики тиристорных контакторов . . . . .	270
18. Регуляторы времени типа РВТ . . . . .	271
19. Универсальный автоматический регулятор УРТ-3 . . . . .	276
20. Состав и работа принципиальной электрической схемы каналов прибора	

КОПР . . . . .	278
21. Устройство контроля отклонения величины осадки . . . . .	280
22. Определение величины координатных коррекций сварочного инстру- мента . . . . .	281
С п и с о к и с п о л ь з о в а н н о й и р е к о м е н д у е м о й л и т е - р а т у р ы . . . . .	286
П р е д м е т н ы й у к а з а т е л ь . . . . .	290

## Учебное пособие

*Владимир Константинович Лебедев  
Валерий Павлович Черныш  
Олег Петрович Бондаренко  
Валерий Семенович Гавриш  
Леонид Антонович Искра  
Феликс Николаевич Киселевский  
Владимир Петрович Кривонос  
Юрий Николаевич Кутепов  
Юрий Николаевич Ланкин  
Виктор Анатольевич Тимченко  
Радий Михайлович Широковский*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ**

*Редактор Е. Ф. Воробьева  
Переплет художника В. Г. Самсонова  
Художественный редактор С. П. Духленко  
Технический редактор В. М. Авдеенко  
Корректор С. Я. Кахетелидзе*

Информ. бланк № 10567

Сдано в набор 27.09.85. Подп. в печать 26.06.86.  
БФ 02132. Формат 60 × 90/16. Бумага типогр. № 1.  
Лит. гарн. Выс. печать. Печ. л. 18,5. Кр.-отт.  
18,5. Уч.-изд. л. 22,12. Тираж 6000 экз. Изд.  
№ 7121. Зак. 6-78. Цена 1 р. 10 к.

Головное издательство издательского объединения  
«Вища школа», 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7.

Книжная фабрика им. М. В. Фрунзе, 310057,  
Харьков-57, Донец-Захаржевского, 6/8.

*В Головном издательстве издательского объединения «Вища школа» в 1987 году выйдут в свет книги:*

**Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М.** Напряжения и деформации при сварке: Учеб. пособие.— К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987 (I кв.).— 20 л.— Яз. рус.— 85 к. (ТП 1987, поз. 224).

Рассмотрены вопросы образования сварочных напряжений и деформаций, их влияние на прочность, расчетные и экспериментальные методы их определения и уменьшения. Приведены примеры решения некоторых типовых задач, даны контрольные вопросы.

Для студентов вузов сварочных специальностей. Может быть полезно инженерно-техническим и научным работникам.

**Робототехнические системы в сборочном производстве:** Учеб. пособие/Руководитель авт. кол. канд. техн. наук Е. В. Пашков.— К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987 (IV кв.).— 17 л.— Яз. рус.— 80 к. (ТП 1987, поз 1916.).

Приведены рекомендации по проектированию основных элементов промышленных «сборочных» роботов и сборочных систем, методы их расчета. Сформулированы требования к приводам промышленных роботов, даны методики расчета и конструирования цифровых и следящих пневмоприводов.

Рассмотрены принципы построения систем управления сборочными роботами и системами. Даны алгоритмы управления, примеры переналаживаемых сборочных систем, описаны методы их испытания.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения».

*Уважаемые товарищи!*

*Эти книги можно заказать в магазинах облкниготоргов, облпотребсоюзов, и также в специализированных магазинах «Книга — почтой».*