

УДК 621.791.763.2

А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

UDC 621.791.763.2

A. Y. Polyakov, S. M. Furmanov, T. I. Bendik

THE AUTOMATIC SYSTEM FOR CONTROLLING RESISTANCE PROJECTION WELDING PROCESS

Аннотация

Усовершенствована имитационная модель управления процессом контактной рельефной сварки путем введения оператора задания ступенчатой формы импульса сварочного тока. Разработано устройство согласования, позволяющее реализовать внешнее управление позициями регулятора цикла сварки контактной машины с помощью имитационной модели. Создана система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки, которая анализирует значение полной энергии, выделяемой в межэлектродной зоне, на основании и этого дает возможность стабилизировать тепловложение в зону сварки и практически исключить возникновение дефектов.

Ключевые слова:

рельефная сварка, устройство согласования, устройство сбора данных, имитационная модель, регулятор сварки, автоматическое регулирование, задание тока, энергия сварки.

Abstract

The simulation model of the automatic control of the process of resistance projection welding has been improved due to the introduction of the operator setting up a stepwise form of a welding current pulse. The matching device has been developed to perform the external control of the welding cycle controller of a resistance welding machine by means of the simulation model. The system for automatic control of the process of resistance projection welding has been designed, which analyzes the magnitude of the total energy released in the inter-electrode zone and based on this stabilizes heat input in the welding zone and virtually eliminates the occurrence of defects.

Key words:

resistance projection welding, matching device, data collection unit, simulation model, controller of the welding cycle, automatic control, current adjustment, energy of welding.

Контактная рельефная сварка (КРС) любых соединений – процесс крайне быстротечный (десятые и сотые доли секунды). Скорректировать необходимые параметры режима КРС в случае нарушений технологического процесса из-за наличия возмущающих зону сварки воздействий способна лишь система автоматического регулирования, главная задача которой состоит в том, чтобы за это короткое время произвести

операцию измерения, сравнения нужных величин и выдать управляющие сигналы, которые обеспечат стабилизацию определенных параметров режима сварки, например, величины и длительности протекания сварочного тока.

Регуляторы цикла сварки типов РКС-801, РВИ-801, широко используемые сегодня на многих предприятиях СНГ при комплектации машин контактной сварки, способны изменять крутиз-

ну нарастания и амплитуду импульсов сварочного тока, а также длительность их протекания в периодах сетевого напряжения с установленной точностью ($\pm 2 \dots 3$ периода). При сварке это приводит к преждевременному выключению сварочного тока или увеличению длительности его протекания, что в условиях непрерывной работы машины обычно не отслеживается. Регуляторы цикла сварки при одноимпульсном режиме работы способны изменять лишь плавность нарастания импульса сварочного тока (модуляция) до некоторого максимального значения, которое установлено изначально при настройке позиции регулятора *НАГРЕВ* от 0 до 9.

Однако такой способ искусственной модуляции при КРС не является эффективным, т. к. из-за относительно высокого сопротивления межэлектродной зоны в начале процесса сварки происходит естественная модуляция тока – плавное нарастание его амплитуды. И в том и в другом случае исключить появление выплесков расплавленного металла не удастся, поэтому при КРС некоторых соединений, например, пакетных (сварка трех и более деталей за один цикл), существует необходимость ступенчатого изменения величины сварочного тока во времени, т. е. на различных этапах формирования сварного соединения, т. к. только благодаря этому можно обеспечить или даже повысить требуемую прочность соединения без 70-...80-процентного проплавления деталей пакета [1, 2].

Известна система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки (КТС) КСУ КС 03, содержащая контактную машину; датчики тока, напряжения, усилия сжатия, ускорения; измерительные преобразователи, аналого-цифровой преобразователь; микроконтроллер; адаптер; персональный компьютер. В процессе сварки сигналы с датчиков поступают на измерительные преобразователи,

воспринимаются аналого-цифровым преобразователем, после чего системный блок микроконтроллера с периодом 10 мс выдает интегральные значения тока, напряжения, усилия сжатия и ускорения электродов, по которым компьютер верхнего уровня микроконтроллера рассчитывает требуемые параметры режима сварки и по встроенному алгоритму «нечеткой» логики осуществляет их сравнение с фактическими режимами сварки с отображением отклонений на дисплее компьютера [3].

Также ранее была создана система для измерения параметров тепловыделения, исследования и управления процессами КТС на однофазных машинах переменного тока, содержащая контактную машину; блоки цифрового ввода-вывода «Л-Кард», согласования (БС), регистрации включенного состояния тиристоров (РВТ); персональный компьютер. Данная установка позволяет в процессе сварки рассчитывать на персональном компьютере фактическое тепловыделение q_n в межэлектродном промежутке в каждом периоде сетевого напряжения по специальной формуле после задания на блоке «Л-Кард» импульсов синхронизации при переходе сетевого напряжения через ноль и определения посредством блоков РВТ и БС длительности λ импульса сварочного тока при заданном угле α его включения [4].

Наряду со всеми своими достоинствами рассматриваемые системы имеют довольно сложную аппаратную реализацию, поэтому не находят широкого применения на производстве. Кроме того, они не способны после анализа состояния датчиков и значения тепловложения корректировать в ходе процесса сварки основные параметры режима, такие как величина и длительность протекания сварочного тока, т. е. воздействовать на начальные настройки регулятора цикла сварки в случае возможных нарушений технологического процесса, например, в результате шунтирования сварочного тока из-за перекоса и каса-

ний свариваемых деталей по краям и другим участкам их поверхностей.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что разрабатываемая система автоматического управления процессом КРС должна выполнять следующие задачи:

- воздействие на аппаратуру управления контактной машиной непосредственно в процессе сварки, т. е. внесение корректировок в отработку позиций регулятора цикла сварки независимо от его начальных настроек согласно фактическим сигналам процесса сварки, поступающим в систему управления с датчиков тока и напряжения;

- введение в зону сварки с высокой степенью точности минимально необходимого количества энергии для формирования литых зон требуемых размеров и формы при гарантированных прочностных показателях получаемого сварного соединения, что позволит избежать возникновения выплесков расплавленного металла или непроваров сварного шва;

- обеспечение максимально возможной скорости приема и обработки сигналов процесса сварки от датчиков программным обеспечением, в котором создается алгоритм автоматического управления процессом сварки, и различными вспомогательными устройствами;

- учет инерционности привода сжатия контактной машины, т. е. прием и программная обработка сигналов должны начинаться именно в тот момент, когда через зону сварки после предварительного сжатия электродов начинает протекать сварочный ток;

- предотвращение нарушений технологического процесса, например, если сварщик по ошибке установил на регуляторе цикла сварки неверные режимы (занизил длительность протекания сварочного тока), то система автоматического управления должна вывести сообщение *ОШИБКА* на монитор и заблокировать позицию *НАЖАТИЕ ПЕДАЛИ* до внесения необходимых корректиро-

вок на регуляторе;

- сохранение максимальных удобств для работы сварщика, т. е. введение системы автоматического управления процессом сварки не должно отрицательно сказаться на прежней производительности труда сварщика;

- ремонтпригодность, т. е. простота диагностики и замены неисправных элементов системы управления процессом сварки.

В [5–7] было предложено использовать полную энергию $Q_{ЭЭ}$, выделяющуюся в межэлектродной зоне, в качестве наиболее информативного параметра для управления процессом контактной рельефной сварки. Таким образом, первым входным параметром в разрабатываемой системе управления является величина сварочного тока, которую требуется задавать ступенчато для регулирования скорости деформирования металла зоны соединения на разных этапах сварки. Второй входной параметр – задаваемая энергия $Q_{ЭЭ}$, расчет которой должен производиться на основе измерения и регистрации фактических сигналов сварочного тока и напряжения межэлектродной зоны непосредственно в процессе сварки.

Выходными параметрами при этом являются откорректированные значения полной длительности протекания сварочного тока $\tau_{СВ}$ и длительности протекания тока на отдельных этапах сварки. Задание величины тока и корректировка временных параметров осуществлялись путем воздействия сигналами напряжения определенной величины с аналоговых и цифровых выходов устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS USB 6251 (устройство NI) посредством имитационной модели в программной среде LABVIEW (среда LVW) на позиции регулятора цикла сварки (РЦС), такие как *ЗАДЕРЖКА ЦИКЛА НА ПОЗИЦИИ СЖАТИЕ*, *НАГРЕВ 1*, *НАГРЕВ 2* и *ОГРАНИЧЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТОКА*.

Так как сигналы на аналоговых и

цифровых выходах устройства NI по своим характеристикам маломощные для непосредственного воздействия на входы РЦС, необходимо было разработать специальное устройство согласования, которое позволило бы не только усиливать и регулировать мощность сигналов по каналам устройство NI-РЦС, но и подключать устройство NI к РЦС через специальный разъем регулятора для внешнего управления.

Для решения данной проблемы было разработано устройство согласо-

вания (УС), состоящее из двух каналов.

1. Канал усиления аналоговых сигналов управляющего напряжения. Построен на базе двух операционных усилителей и используется для регулирования величины сварочного тока.

2. Канал усиления цифровых сигналов на базе двух транзисторов и двух электромагнитных реле. Управляет включением и выключением сварочного тока.

Принципиальная электрическая схема УС представлена на рис. 1.

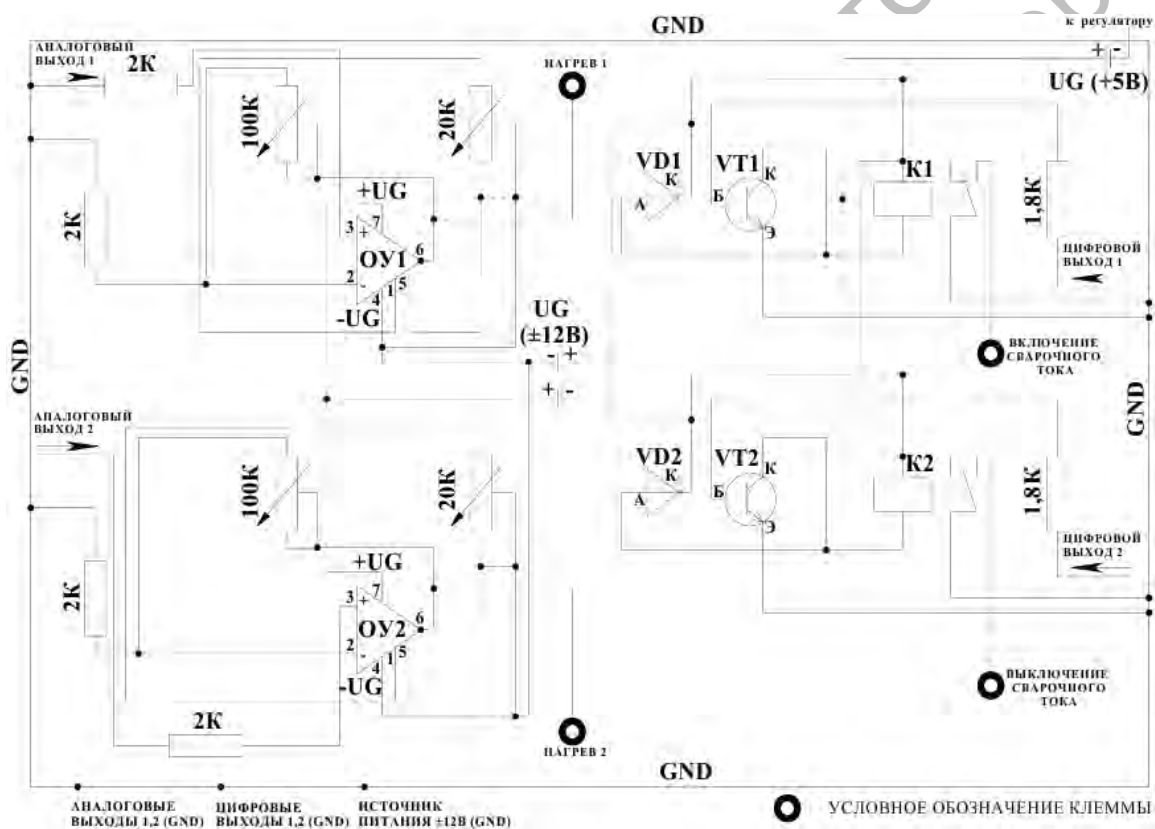


Рис. 1. Устройство согласования

Канал усиления аналоговых сигналов содержит: операционные усилители КРУД708 (на схеме ОУ1, ОУ2); двухполярный источник питания для операционных усилителей ($U_G \pm 12\text{ В}$); четыре резистора по 2 кОм; два переменных резистора по 100 кОм; два переменных резистора по 20 кОм. На вход канала поступает управляющее

напряжение с аналогового выхода NI в диапазоне $0 \dots 0,065\text{ В}$, задаваемое в имитационной модели. Операционные усилители (ОУ) позволяют осуществлять раздельную балансировку переменным резистором 20 кОм и регулировку выходных сигналов до требуемого уровня переменным резистором 100 кОм в обратной связи, изменяющим коэффици-

ент усиления ОУ. Усиленные сигналы воздействуют на позиции *НАГРЕВ 1* и *НАГРЕВ 2* регулятора (двухимпульсный режим сварки). Таким образом, регулируется амплитуда первого и второго импульсов сварочного тока от $0,41 \cdot I_{CBmax}$ до I_{CBmax} (I_{CBmax} – максимальный сварочный ток, обеспечиваемый контактной машиной на данной ступени регулирования сварочного трансформатора).

В табл. 1 приведен экспериментально определенный диапазон напряжений, необходимых для воздействия

устройством NI и средой LVW посредством УС на позиции *НАГРЕВ 1* и *НАГРЕВ 2* РЦС.

Для реализации ступенчатого задания импульса сварочного тока ранее предлагаемая имитационная модель управления процессом контактной рельефной сварки, созданная в среде LVW [7], была дополнена специальным оператором координатного задания сигнала, после чего цикл задания уровня сварочного тока на требуемой ступени стал выглядеть следующим образом (рис. 2).

Табл. 1. Диапазон управляющих напряжений для регулятора цикла сварки РКС-801 и контактной машины МТ-1601 (коэффициент усиления сигналов $K = 11,3$)

| Управляющее напряжение, В | Фактический сварочный ток |
|---------------------------|---------------------------|
| 0 | I_{CBmax} (15...16 кА) |
| 0,025 | $0,85 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,03 | $0,83 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,035 | $0,8 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,04 | $0,64 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,045 | $0,62 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,05 | $0,5 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,055 | $0,48 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,06 | $0,43 \cdot I_{CBmax}$ |
| 0,065 | $0,41 \cdot I_{CBmax}$ |

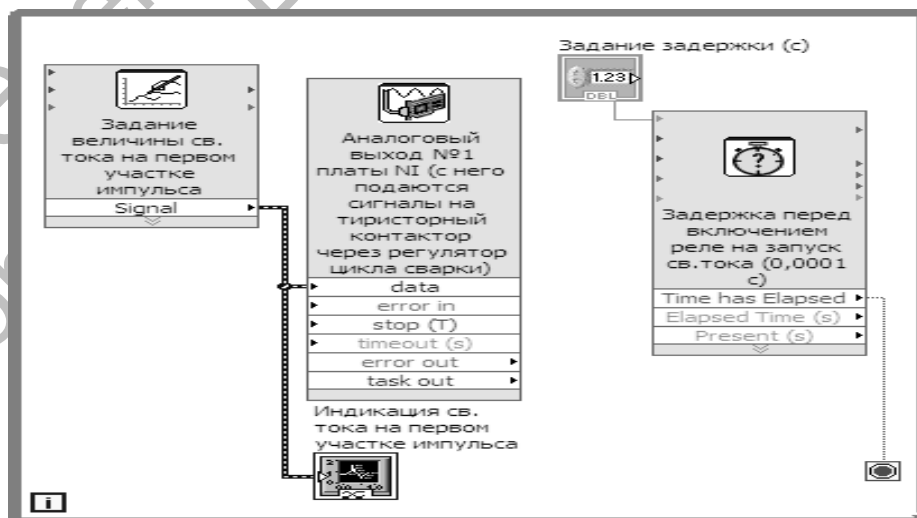


Рис. 2. Цикл координатного задания величины управляющего напряжения на первом участке импульса сварочного тока при его ступенчатом задании

Канал усиления цифровых сигналов содержит: два электромагнитных реле NT732С (K1, K2); однополярный источник питания реле ($U_G +5 В$); два резистора по 1,8 кОм; два транзистора КТ972А (VT1, VT2) и два диода (VD1, VD2). Этот канал предназначен для усиления цифровых сигналов напряжения, воздействующих на входы регулятора РКС-801 **ЗАДЕРЖКА ЦИКЛА НА ПОЗИЦИИ СЖАТИЕ** и **ОГРАНИЧЕНИЕ СВАРОЧНОГО ТОКА**. При этом первый цифровой сигнал напряжением включения контакта электромагнитного реле запускает команду **ВКЛЮЧЕНИЕ СВАРОЧНОГО ТОКА**, а второй – команду **ВЫКЛЮЧЕНИЕ СВАРОЧНОГО ТОКА** в определенные моменты времени, соот-

ветствующие условию достижения расчетной энергией зоны сварки заданного значения, независимо от начальных временных настроек регулятора.

Посредством кабеля управления РШАВКУ-14 осуществляется передача управляющих импульсов напряжения с выходов УС на внешние входы управления РЦС.

В целом, аппаратура системы автоматического управления процессом контактной рельефной сварки включает в себя ЭВМ, устройства ПИ и УС, а также РЦС (рис. 3). Сущность автоматического управления поясняется упрощенной структурной схемой, приведенной на рис. 4.



Рис. 3. Аппаратура системы автоматического управления процессом контактной рельефной сварки



Рис. 4. Структурная схема системы автоматического управления процессом контактной рельефной сварки

Система автоматического управления содержит: машину для контактной рельефной сварки, представленную на схеме РЦС 1 электродами сварочной машины 2 и тиристорным контактором 3; датчик тока 4; два экранированных кабеля 5 для регистрации напряжения межэлектродной зоны; устройство NI 6; ЭВМ 8 с программной средой LVW 7; УС 9; кабель управления 10.

Система работает следующим образом.

1. Перед началом сварки деталей 11 сварщиком однократно нажимается кнопка *ПУСК ПО ЦИКЛУ* имитационной модели среды LVW 7, выведенная на панель управления контактной машины, что приводит программу процесса автоматического регулирования к готовности, причем без нажатия данной кнопки при нажатии педали машины сработает только пневматический клапан привода сжатия, но сварочный ток не включится.

2. После нажатия сварщиком на педаль контактной машины срабатывает

нормально разомкнутое электромагнитное реле УС 9 (на рис. 1 не показано). Питание катушки реле напряжением 24 В осуществляется посредством кабеля управления 10 от самого РЦС 1. Замыкающий контакт реле передает цифровой сигнал величиной 5 В с цифрового выхода устройства NI 6 на его же цифровой вход, что является сигналом к старту программы регулирования. Срабатывание вышеуказанного реле – также сигнал к запуску цикла сварки на РЦС 1, т. е. срабатывает пневматический клапан привода сжатия и опускается верхний подвижный электрод контактной машины 2.

3. После старта программы регулирования срабатывает цикл задания управляющего напряжения, пропорционального величине сварочного тока на первом участке кривой при его трехступенчатом задании (рис. 5). Сигнал напряжения после усиления УС 9 поступает за 0,01 с посредством кабеля управления 10 на разъем внешнего управления РЦС 1.

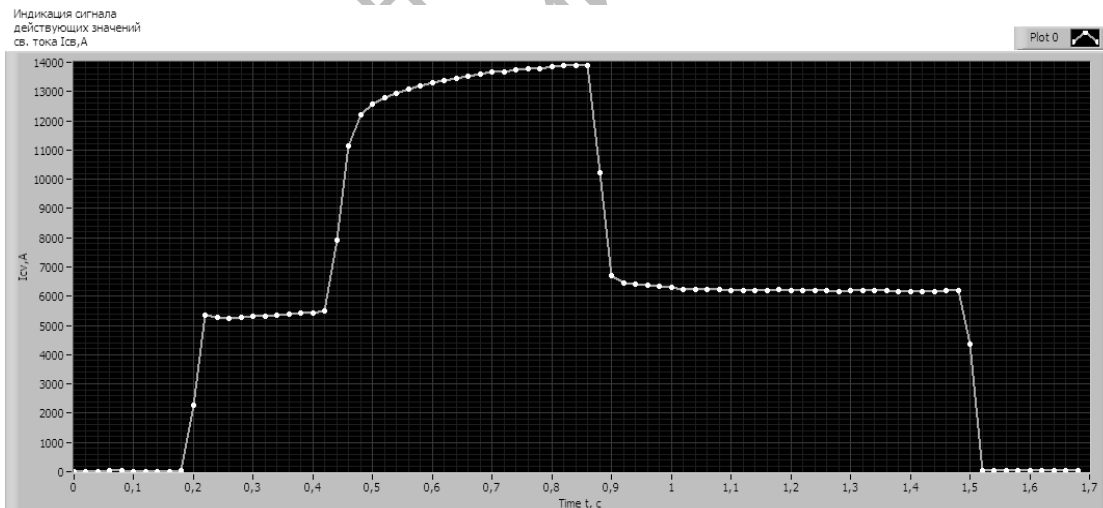


Рис. 5. Кривая сварочного тока при его трехступенчатом задании

4. После предварительного задания величины тока на первом участке срабатывает второй цикл, включающий по логическому условию *ИСТИНА* нор-

мально разомкнутое электромагнитное реле К1, контакт которого при замыкании выключает за 0,01 с *ЗАДЕРЖКУ ЦИКЛА НА ПОЗИЦИИ СЖАТИЕ*. При

этом РЦС воздействует на тиристорный контактор 3, в результате чего через свариваемые детали 11 начинает протекать сварочный ток первой ступени.

5. Одновременно с включением сварочного тока запускается цикл расчета энергии, выделяемой на первом участке кривой тока. Устройство NI 6 каждые 0,009 с регистрирует мгновенные сигналы сварочного тока $I'_{СВ}$ и напряжения межэлектродной зоны $U'_{ЭЭ}$ посредством установленного на электродах сварочной машины 2 датчика тока 4 и пары экранированных кабелей 5. При этом блок-диаграмма среды LVW 7 на ЭВМ 8 автоматически осуществляет расчет полной фактической энергии зоны сварки за каждые 0,009 с, одновременно аккумулируя и сравнивая эту величину с заданным значением требуемой энергии на первом участке, занесенным в память программы. Как только фактическая аккумулированная энергия достигает заданного значения, цикл расчета завершается.

6. После завершения расчета энергии на первом участке срабатывает цикл задания управляющего напряжения, пропорционального величине сварочного тока на втором и третьем участках его кривой (см. рис. 5). Аналогично первому участку происходит расчет фактической энергии и сравнение ее с заданными значениями, занесенными в память программы, на втором и третьем участках.

7. После завершения расчета энергии на третьем участке срабатывает цикл, включающий по логическому условию *ИСТИНА* нормально замкнутое электромагнитное реле К2, которое размыканием своего контакта за 0,01 с снимает напряжение с внешнего входа *ОГРАНИЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ТОКА* и, соответственно, РЦС выключает сварочный ток.

8. Для того чтобы учесть фактическую энергию, выделяемую на неуправляемом участке синусоиды сварочного

тока от подачи сигнала на его отключение до полного закрытия тиристорного контактора после снятия управляющих импульсов, программа за дополнительный отрезок времени, равный 0,02 с, продолжает регистрировать мгновенные сигналы сварочного тока $I'_{СВ}$ и напряжения межэлектродной зоны $U'_{ЭЭ}$. Ровно через 0,02 с данный цикл завершается.

9. После завершения расчета полной энергии через 0,01 с по логическому условию *ЛОЖЬ* происходит выключение электромагнитных реле К1 и К2. Далее срабатывает цикл задания нулевого напряжения, устанавливающий нулевой уровень сварочного тока, после чего задается пауза до готовности программы к следующему циклу сварки. Система автоматического управления возвращается в исходное состояние.

Общая временная схема процесса управления регулятором цикла сварки представлена на рис. 6.

Следует отметить, что если фактическая полная энергия, выделяемая в зоне сварки, не достигла требуемого значения на любом из участков, что крайне маловероятно, т. к. длительность протекания сварочного тока на РЦС задается с большим запасом, то блок-диаграмма через интервал времени, равный 0,5 с, включает реле К2, ответственное за выключение тока, и тут же отключит оба реле К1 и К2, что приведет к завершению работы программы и ее подготовке к следующему циклу сварки.

Указанная последовательность действий разработанной системы обеспечивает автоматическое регулирование длительности протекания сварочного тока при его программном задании, что, в свою очередь, стабилизирует процессы деформирования металла зоны сварочного соединения и формирования литого ядра 12 (см. рис. 4) требуемых размеров и формы при существенном уменьшении вероятности появления выплесков и непроваров.

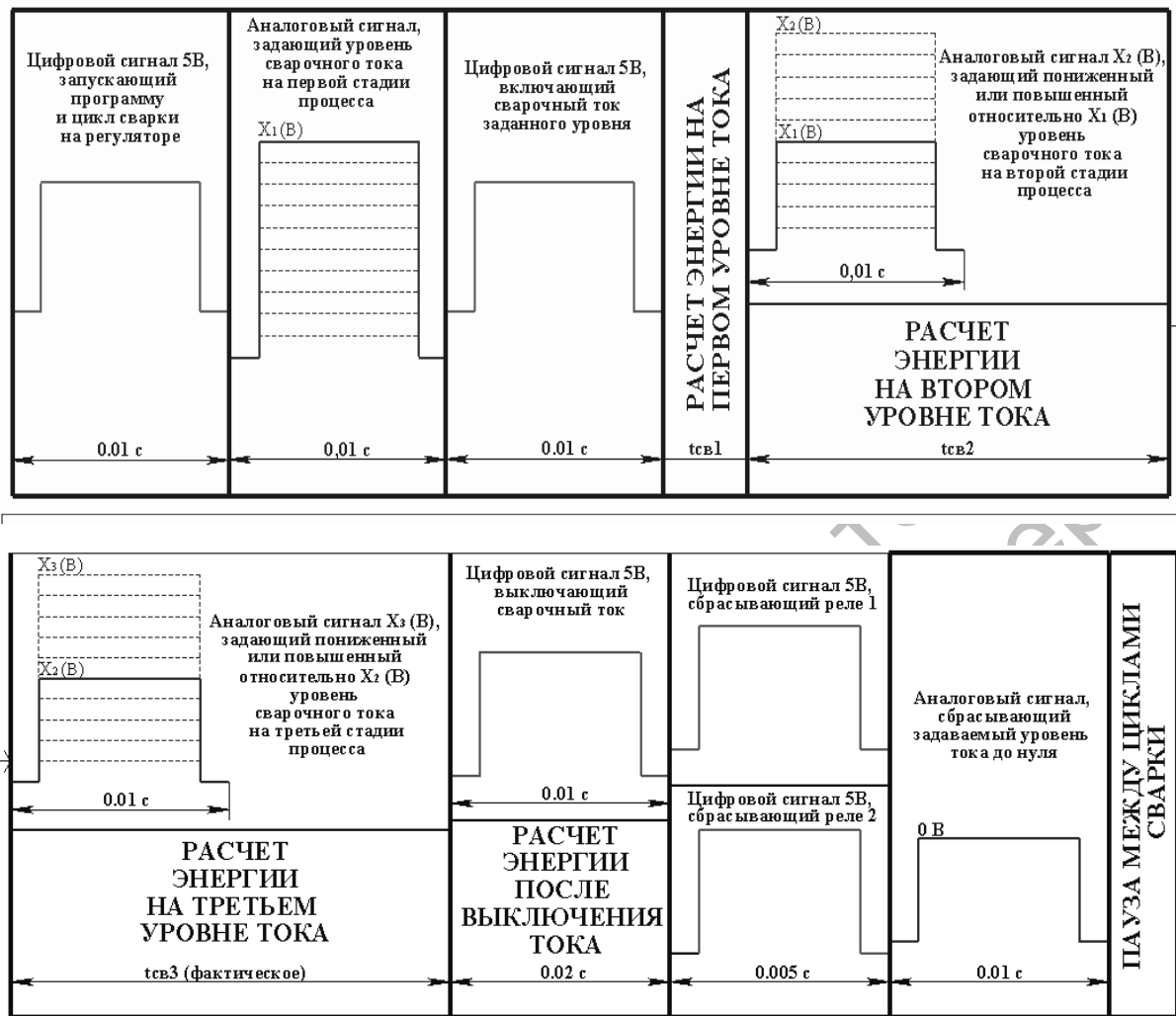


Рис. 6. Общая временная схема процесса управления регулятором цикла сварки

Выводы

1. Создан цикл координатного задания требуемого уровня сварочного тока, включение которого в ранее разработанную имитационную модель управления процессом контактной рельефной сварки (программная среда LABVIEW) позволило реализовать ступенчатое задание импульса сварочного тока на необходимых стадиях формирования сварного соединения.
2. Экспериментально определен диапазон напряжений от 0 до 0,065 В, позволяющий автоматически задавать через устройство NATIONAL INSTRUMENTS в программной среде LABVIEW требуемое значение свароч-

ного тока от $0,41 \cdot I_{CBmax}$ до I_{CBmax} на регуляторе РКС-801 контактной машины МТ-1601.

3. Разработано устройство согласования на базе транзисторов, электромагнитных реле и операционных усилителей с переменным коэффициентом усиления, позволяющее усиливать мало-мощные сигналы постоянного напряжения, поступающие с устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS на регулятор цикла сварки РКС-801, с целью корректировки его позиций, ответственных за величину и время протекания сварочного тока, независимо от начальных настроек регулятора.

4. Разработана система автомати-

ческого управления процессом контактной рельефной сварки, содержащая машину для контактной сварки, регулятор цикла сварки, устройство сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS, ЭВМ с программной средой LABVIEW и устройство согласования. Данная система с помощью имитационной модели управления, созданной в среде LABVIEW, позволяет ступенчато задавать величину сварочного тока и энергию тепловложения в процессе сварки на разных его этапах, принимать мгновенные сигналы тока и напряжения межэлектродной зоны посредством устройства сбора данных и датчиков, рассчитывать полную энергию, выделяемую в межэлектродной зоне, и сравнивать ее с заданными

значениями, после чего посредством устройства согласования вырабатывать в ходе сварки управляющие импульсы напряжения заданной амплитуды, воздействующие на позиции регулятора цикла сварки, в результате чего сварочный ток ограничивается по времени на каждом из этапов формирования соединения. Это стабилизирует тепловложение в зону сварки и существенно уменьшает вероятность появления выплесков расплавленного металла и непроваров сварного шва. Быстродействие разработанной системы ограничивается временем выключения тиристорного контактора после снятия управляющих импульсов и составляет не более 0,01 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 151 с.
2. **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
3. **Руденко, П. М.** Портативная система контроля и управления процессом контактной точечной сварки / П. М. Руденко, В. С. Гавриш // Автоматическая сварка. – 2010. – № 2. – С. 36–40.
4. Компьютерный комплекс для исследования и управления процессами сварки / А. С. Климов [и др.] // Сварочное производство. – 2006. – № 3. – С. 32–34.
5. Методика программного управления процессом контактной точечной сварки / В. П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. – 2010. – № 8. – С. 139–144.
6. **Поляков, А. Ю.** О формировании ступенчатых соединений при контактной рельефной сварке / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 62–69.
7. Оптимизация количества энергии, вводимой в зону рельефной сварки пакетных соединений / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 67–77.

Статья сдана в редакцию 15 августа 2013 года

Андрей Юрьевич Поляков, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-23-53-12. E-mail: mortis2008@mail.ru.

Сергей Михайлович Фурманов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-26-71-25. E-mail: furm@mail.ru.

Татьяна Ивановна Бендик, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-42-76-56.

Andrei Yuryevich Polyakov, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375- 222-23-53-12. E-mail: mortis2008@mail.ru.

Sergey Mikhailovich Furmanov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-26-71-25. E-mail: furm@mail.ru.

Tatiana Ivanovna Bendik, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-293-42-76-56.