

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-72-80

УДК 621.791.763.2

С. М. ФУРМАНОВ, канд. техн. наук, доц.

Д. Н. ЮМАНОВ, канд. техн. наук

А. О. СЕРГЕЙЧИК

С. В. БОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц.

А. Д. МИХАЛЮТО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ В ПРОЦЕССЕ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

Аннотация

Разработан программный код в среде графического программирования LabVIEW, позволяющий использовать эталонные характеристики перемещения подвижного электрода для построения системы адаптивного регулирования мощности рельефной сварки. Задание величины тока подогрева осуществляется с учетом коэффициента подогрева, зависящего от величины усилия сжатия электродов. Переход к нарастанию тока от подогрева к сварке происходит при достижении перемещения электрода при подогреве определенной величины, указывающей на достаточную степень разогрева рельефа. Скорость нарастания тока регулируется коэффициентом датчика скорости, который зависит от скорости перемещения электрода. Выключение сварочного тока происходит при достижении величины деформации рельефа 80 %...90 % от его начальной высоты, в связи с чем повышается эффективность проковки соединения.

Ключевые слова:

контактная точечная и рельефная сварка, программные средства регулирования, система адаптивного регулирования, перемещение подвижного электрода, графическое программирование, виртуальный регулятор цикла сварки.

Для цитирования:

Разработка программных средств системы адаптивного регулирования мощности в процессе рельефной сварки / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, А. О. Сергейчик, С. В. Болотов, А. Д. Михалюто // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 72–80.

Введение

Изучение и разработка однопараметрических микропроцессорных систем контроля и управления процессом контактной точечной и рельефной сварки представляет значительный интерес для промышленности. Разрабатываемые системы управления сосредотачиваются на контроле напряжения между электродами сварочной машины, динамического сопротивления зоны соединения или перемещения подвижного электрода.

Системы, основанные на измерении напряжения или динамического сопротивления, имеют обширный опыт

использования в промышленности [1–4], в то время как системы, основанные на управлении процессом сварки по перемещению электрода, пока мало используются из-за более сложного алгоритма управления и недостаточного опыта исследований в данной области.

Параметр управления, связанный с перемещением подвижного электрода во время сварки, непосредственно указывает на качество сварного соединения. Однако создание эффективного алгоритма управления на основе этого параметра требует более сложного подхода, чем у других методов контроля. Системный подход к разработке алгоритма управления контактной точечной свар-

кой, основанный на перемещении электрода, предлагает новые перспективы в области контроля сварочных процессов. Использование метода конечных элементов для моделирования процесса сварки и определения физики процесса позволяет более глубоко понять и оптимизировать данную систему управления [1, 5–7].

Разработка эталонных характеристик перемещения электрода с использованием компьютерного моделирования позволяет контролировать как выплеск расплавленного металла шва, так и шунтирование тока при сварке.

Такой подход к контролю контактной точечной и рельефной сварки, основанный на использовании микропроцессорных программных средств для построения систем адаптивного регулирования мощности на основе задания эталонных характеристик перемещения и временных циклограмм, открывает новые возможности для обеспечения стабильного качества сварных соединений непосредственно в процессе сварки, предотвращения возможных дефектов сварных конструкций и по-

вышения эффективности их производства [5–10].

Основная часть

Работа виртуального регулятора цикла сварки контактной сварочной машины реализована при помощи программного кода в среде графического программирования LabView. Структура программы содержит ряд последовательно обрабатываемых блоков.

После запуска программы система находится в режиме ожидания до нажатия на педаль SB1 сварочной машины. При этом перед запуском машины в подготовительном (нулевом) блоке происходит обнуление датчика перемещения подвижного электрода, а также формирование цифрового сигнала «Включение питания клапанов» (рис. 1, а). Цифровой выход P0.3 подключает питание электропневмоклапанов с помощью реле напряжения KV1 и подготавливает их к работе (рис. 1, б). Этим исключается включение клапанов при отключенной от сети плате сбора данных.



Рис. 1. Подключение питания клапанов и обнуление датчика перемещения

В первом блоке программы осуществляется контроль нажатия педали SB1 запуска машины контактной

сварки. После нажатия педали происходит запуск циклограммы процесса контактной рельефной сварки с помощью

триггера PFI 0 (цифровой вход P1.0) (рис. 2, а). Задание цифровых сигналов управления осуществляется с помощью формирователя массива Build Array.

За включение питания катушек клапанов Y1 (Кл.1) малого усилия сжатия электродов при сварке и Y2 (Кл.2) большого усилия при проковке отвечают цифровые выходы платы сбора данных P0.1 и P0.2 соответственно (рис. 2, б). Цифровые триггеры PFI 1/P1.1 и PFI 2/P1.2 отвечают соответственно за «Измерение перемещения электрода»

и «Включение тока». Цифровые индикаторы PFI 5/P1.5, PFI 6/P1.6 и PFI 7/P1.7 сигнализируют соответственно о протекании тока подогрева $I_{под}$, нарастании тока от подогрева к сварке и протекании сварочного тока $I_{св}$ [5, 11, 12].

Второй блок задает время предварительного сжатия электродов сварочной машины. После срабатывания клапана малого усилия сжатия Кл.1 (цифровой выход P0.1) таймер Elapsed Time отсчитывает время предварительного сжатия (рис. 3, а).

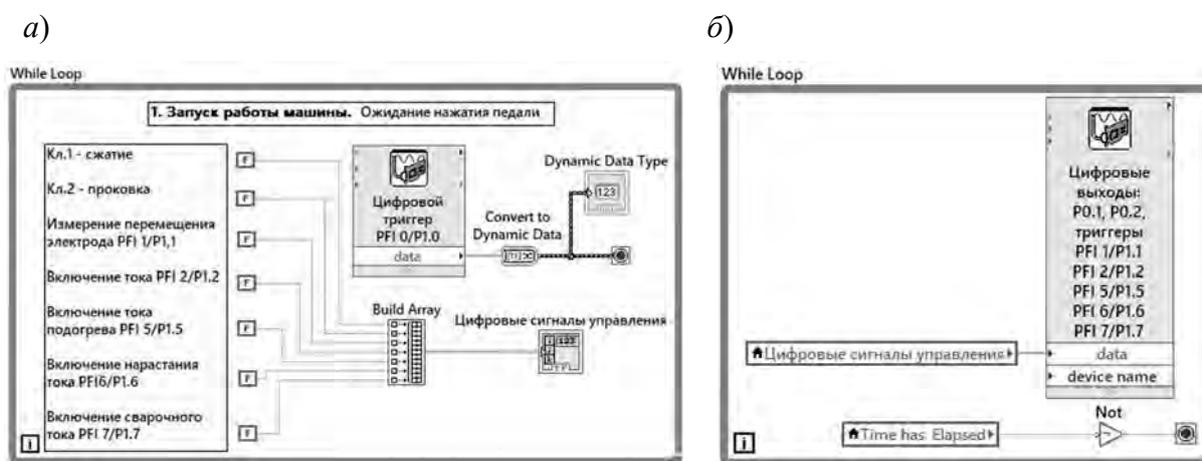


Рис. 2. Запуск работы машины и задание цифровых сигналов управления

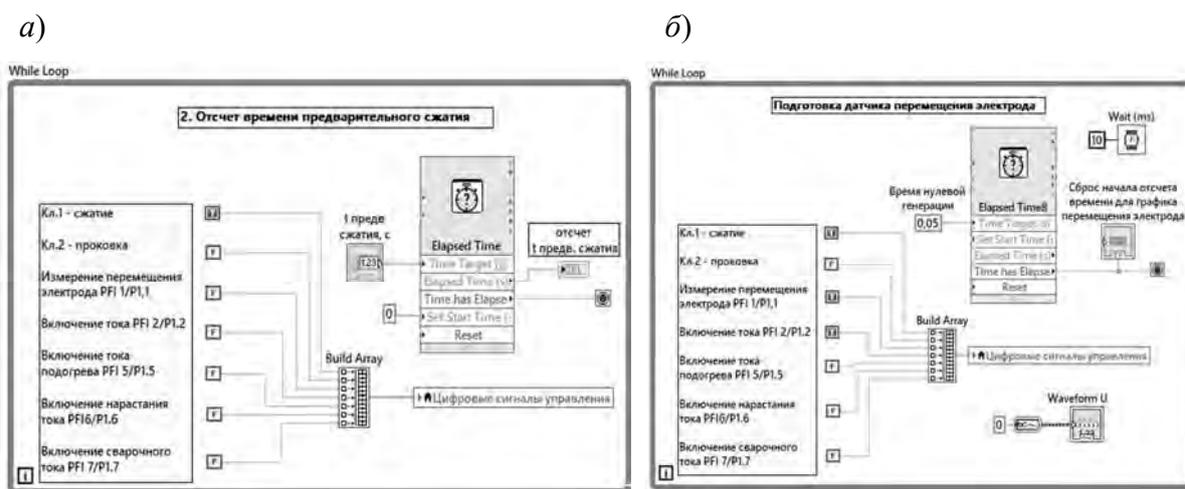


Рис. 3. Задание и отсчет времени предварительного сжатия электродов (а) и подготовка датчика перемещения электрода к измерению сигнала (б)

Далее происходит подготовка датчика перемещения электрода к измерению сигнала (рис. 3, б). Для этого после включения триггера PFI 1/P1.1 «Измерение перемещения электрода» происходит сброс начала отсчета времени для графика перемещения электрода с задержкой цикла на 10 мс с помощью блока Wait (ms).

Срабатывание триггера PFI 2/P1.2 «Включение тока» запускает генерацию сигнала напряжения управления U_y тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М. Сигнал формируется в виде осцилло-

граммы Waveform U. Для учета аппаратной задержки начала регистрации сигнала U_y задается время нулевой генерации в течение 0,05 с.

Третий блок отвечает за отсчет времени протекания тока подогрева $I_{под}$ с помощью таймера Elapsed Time6 (рис. 4). При этом срабатывает индикатор «Включение тока подогрева» (цифровой триггер PFI 5/P1.5). Задание тока подогрева $I_{под}$ осуществляется с учетом коэффициента подогрева $K_{под}$, зависящего от величины усилия сжатия электродов $F_{св}$.

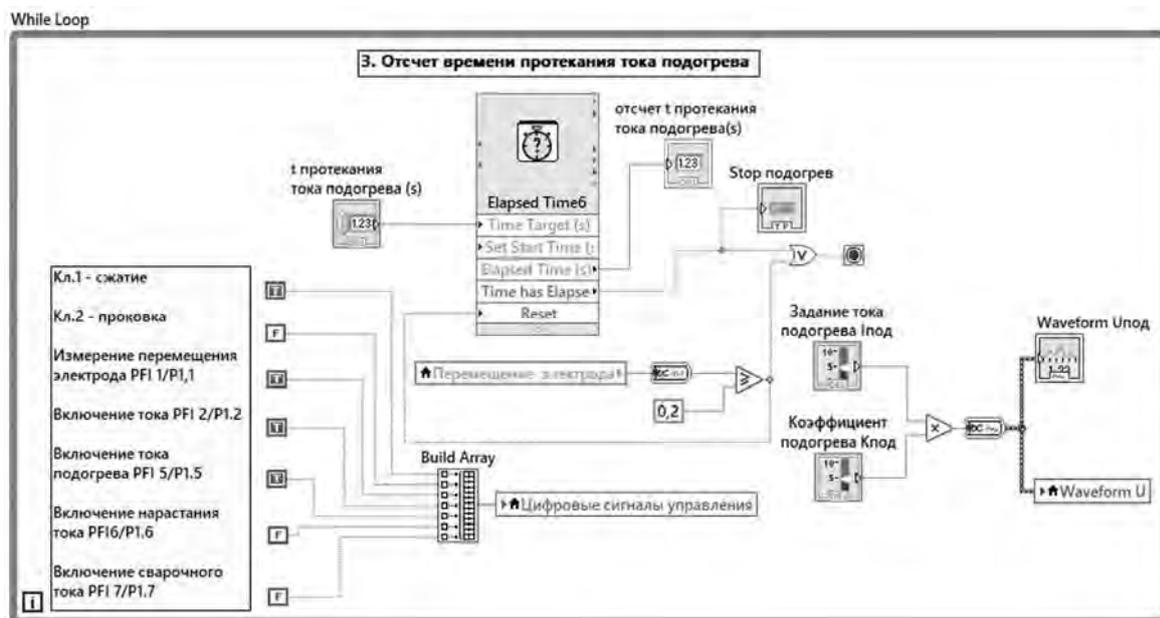


Рис. 4. Задание и отсчет времени протекания тока подогрева

Вначале задается максимально допустимое время подогрева. Окончание цикла подогрева происходит при достижении величины перемещения электрода определенной величины (примерно 0,2 мм), что указывает на достаточную степень разогрева рельефа и возможность нарастания тока до сварочного. Если за допустимое время подогрева величина перемещения не достигла заданной величины, срабатывает сигнал «Stop подогрев», ток выключается и цикл завершается с выводом сообщения «Недостаточный ток подогрева». В ре-

зультате работы блока формируется сигнал напряжения управления при подогреве в виде осциллограммы Waveform U_{под} параллельно с общим сигналом управления U_y – осциллограмма Waveform U.

В четвертом блоке осуществляется задание и отсчет времени нарастания тока от подогрева к сварке. При этом срабатывает индикатор «Включение нарастания тока» (цифровой триггер PFI 6/P1.6) (рис. 5). Контролируемой величиной здесь является скорость нарастания тока, которая регулируется

коэффициентом датчика скорости $K_{ДС}$, зависящим, в свою очередь, от скорости перемещения электрода.

Если в предыдущем блоке сработал сигнал «Stop подогрев», то с помощью блока выбора Case Structure во вкладке True происходит обнуление ос-

циллограммы Waveform U – сигнала управления U_y , иначе обнуление сигнала не происходит.

Переход к выполнению следующего блока происходит при достижении заданного значения сварочного тока $I_{св}$.

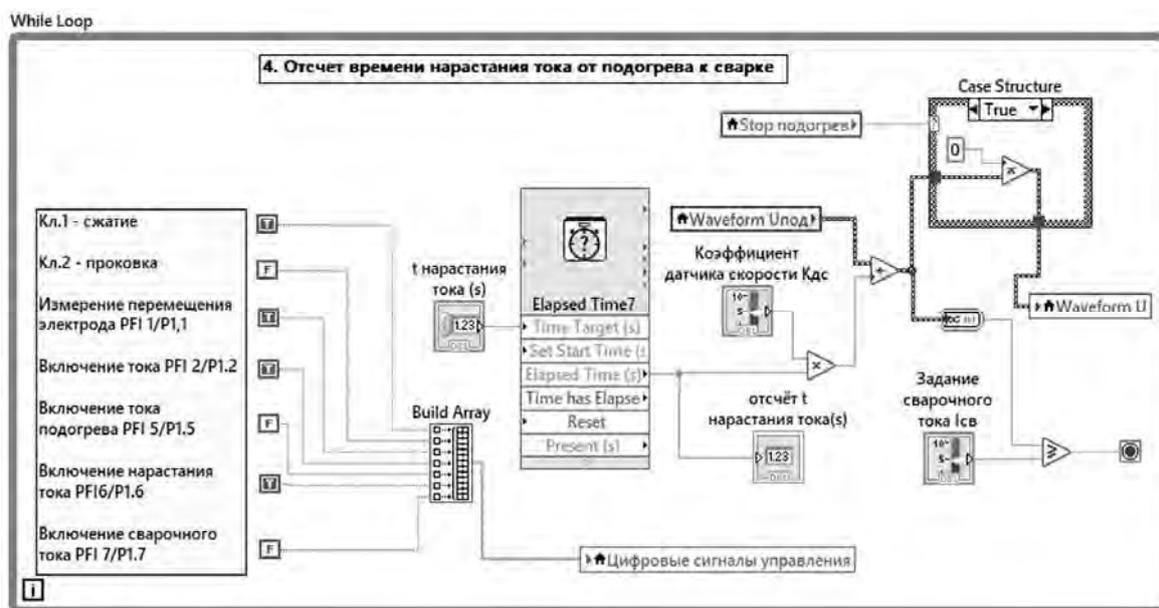


Рис. 5. Задание и отсчет времени нарастания тока от подогрева к сварке

Время протекания сварочного тока $I_{св}$ разделяется на два этапа. При этом срабатывает индикатор «Включение сварочного тока» (цифровой триггер PFI 7/P1.7).

В пятом блоке производится отсчет начала включения повышенного усилия проковки от момента включения сварочного тока (рис. 6) для учета инерционности пневмопривода. Максимальное усилие проковки должно быть достигнуто не позднее, чем через 0,18...0,2 с после выключения тока для эффективного уменьшения растягивающих остаточных напряжений и повышения механических свойств получаемых сварных соединений.

В шестом блоке производится отсчет общего времени протекания сварочного тока $t_{св}$, которое должно быть задано на 0,18...0,2 с больше, чем время

начала включения повышенного усилия проковки $F_{ков}$ (рис. 7). Клапан большого усилия Кл.2 включается с помощью цифрового выхода P0.2 (см. рис. 2, б). Выключение сварочного тока $I_{св}$ происходит при достижении величины деформации рельефа 90 % от его начальной высоты h_p . Этим исключается шунтирование сварочного тока по околошовной зоне при полной деформации рельефа и повышается эффективность проковки соединения. После завершения цикла срабатывает сигнал «Стоп перемещение» с задержкой цикла на 10 мс с помощью блока Wait (ms), который останавливает регистрацию перемещения электрода.

Далее последовательно выполняются блоки отсчета времени проковки сварного соединения усилием $F_{ков}$ без тока (рис. 8, а) и времени паузы между

сварками (рис. 8, б). После отключения тока происходит обнуление осциллограммы Waveform U – сигнала управления U_y .

После завершения всего цикла сварки подачей нулевого сигнала на цифровой выход P0.3 отключается питание электропневмоклапанов (рис. 9).



Рис. 6. Задание и отсчет времени начала включения повышенного усилия проковки от момента включения сварочного тока

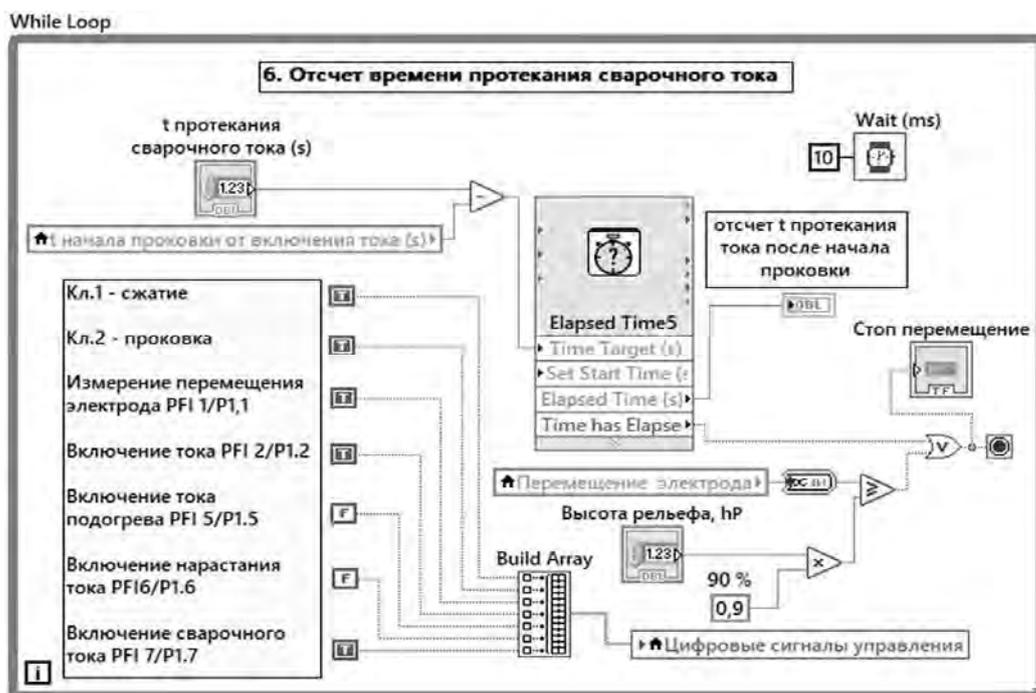


Рис. 7. Задание и отсчет общего времени протекания сварочного тока

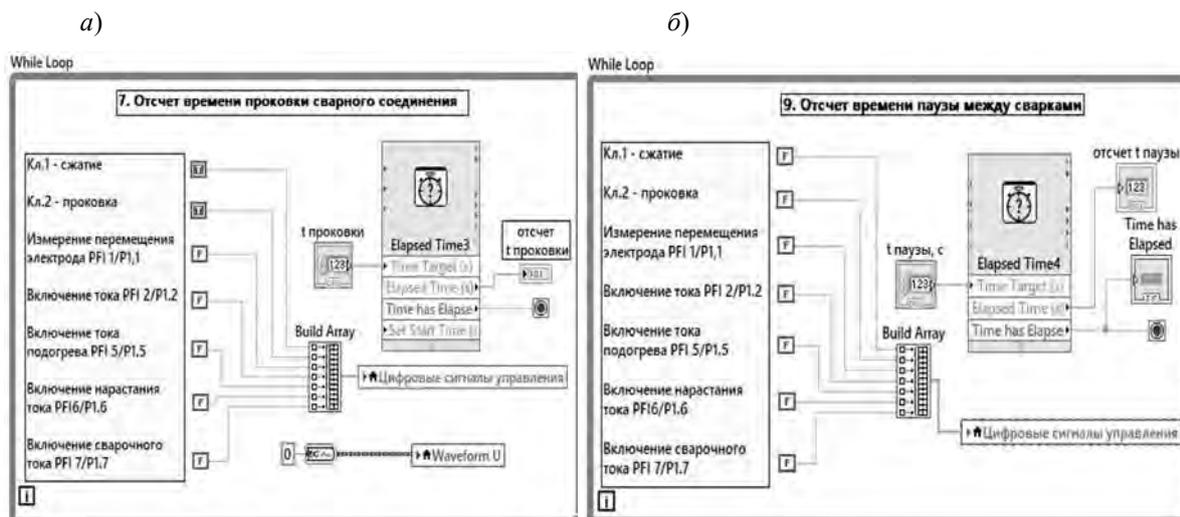


Рис. 8. Задание и отсчет времени проковки (а) и паузы между сварками (б)

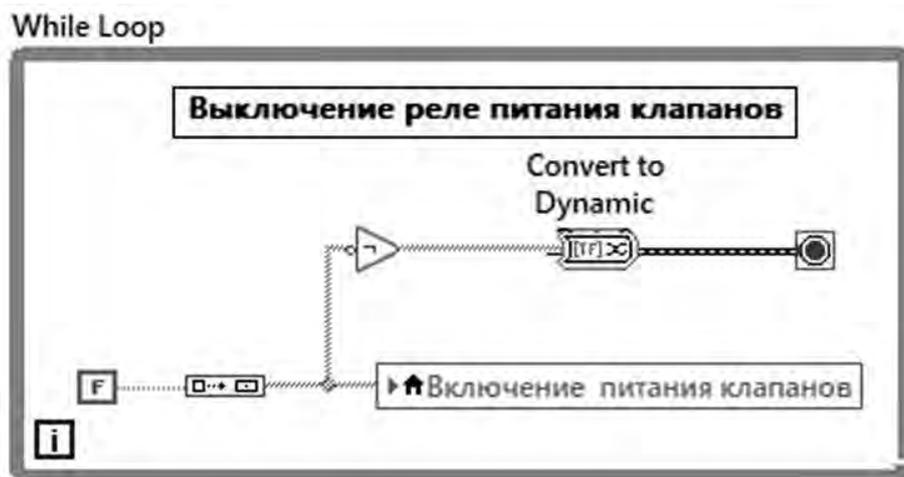


Рис. 9. Отключение питания электропневмоклапанов

Локальная переменная Time has Elapsed используется для сброса таймеров в паузе между сварками. Логический сигнал Time has Elapsed сбрасывается в нулевое значение FALSE при завершении девятого блока (см. рис. 8, б), при этом формирование цифровых выходов останавливается, т. к. через инвертор Not срабатывает условие завершения цикла (см. рис. 2, б). После отсчета паузы сигнал Time has Elapsed снова устанавливается в высокое состояние TRUE и разрешает работу цикла формирования цифровых выходов,

при этом таймеры начинают отсчет сначала.

Таким образом, разработанный виртуальный регулятор контактной сварки на базе графического программирования в среде LabView позволяет использовать эталонные характеристики перемещения подвижного электрода для построения системы адаптивного регулирования мощности в процессе рельефной сварки, что открывает возможности стабилизации качества сварных соединений без прерывания процесса сварки.

Выводы

1. Разработан программный код в среде графического программирования LabVIEW, позволяющий использовать эталонные характеристики перемещения подвижного электрода контактной сварочной машины для построения системы адаптивного регулирования мощности в процессе рельефной сварки.

2. Задание величины тока подогрева $I_{под}$ осуществляется с учетом коэффициента подогрева $K_{под}$, зависящего от величины усилия сжатия электродов $F_{св}$, при этом переход к нарастанию тока от подогрева к сварке происходит при достижении перемещения электрода при подогреве определенной величины (около 0,2 мм), что указывает на до-

статочную степень разогрева рельефа, в обратном случае процесс сварки останавливается.

3. Скорость нарастания тока регулируется коэффициентом датчика скорости $K_{дс}$, который зависит от скорости перемещения электрода, при этом переход к следующему блоку происходит при достижении заданного значения сварочного тока $I_{св}$.

4. Выключение сварочного тока $I_{св}$ происходит при достижении величины деформации рельефа 80 %...90 % от его начальной высоты h_p , в связи с чем исключается полная деформация рельефа, шунтирование сварочного тока по околошовной зоне и повышается эффективность проковки соединения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zhang, H.** Resistance welding. Fundamentals and Applications / H. Zhang, J. Senkara. – New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 446 p.
2. **Kas, Z.** An Electrothermal Model Based Adaptive Control of Resistance Spot Welding Process / Z. Kas, M. Das // Intelligent Control and Automation. – 2015. – Vol. 6, № 2. – P. 134–146.
3. **Kas, Z.** Adaptive Control of Resistance Spot Welding Based on a Dynamic Resistance Model / Z. Kas, M. Das // Mathematical and Computational Applications. – 2019. – № 24 (4): 86–99. – P. 1–14.
4. Effect of Initial (Reference) Welding Current for Adaptive Control and It's Optimization to Secure Proper Weld Properties in Resistance Spot Welding / Md. Ashaduzzaman [et al.] // Journal of Welding and Joining. – 2015. – Vol. 33, № 6. – P. 507–514.
5. **Фурманов, С. М.** Пути совершенствования термомеханических циклов контактной точечной и рельефной сварки: монография / С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 274 с.
6. Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding / C. L. Tsai [et al.] // Welding Research Supplement. – 1991. – № 12. – P. 339–351.
7. **Cho, Y.** Advanced Resistance Spot Welding Technologies: New Machine, Adaptive Control and FEM Simulation / Y. Cho, I. Chang, H. Lee // Materials Science Forum. – 2008. – Vol. 580–582. – P. 367–370.
8. **Psarommatis, F.** Implementation of Zero Defect Manufacturing using quality prediction: a spot welding case study from Bosch / F. Psarommatis, B. Zhou, E. Kharlamov // Procedia Computer Science: 5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing. – 2024. – № 232. – P. 1299–1308.
9. **Yu, J.** Adaptive Resistance Spot Welding Process that Reduces the Shunting Effect for Automotive High-Strength Steels / J. Yu // Metals. – 2018. – № 8 (10), 775. – P. 1–20.
10. **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
11. Разработка программного кода адаптивной системы регулирования мощности при рельефной сварке / С. М. Фурманов [и др.] // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 нояб. 2022 г. – Могилев, 2022. – С. 215–220.
12. Графическое программирование системы адаптивного управления процессом рельефной сварки в среде LabVIEW / С. М. Фурманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2 (79). – С. 107–117.

Статья сдана в редакцию 31 мая 2024 года

Контакты:

rochta_furm@mail.ru (Фурманов Сергей Михайлович);
oitsp.dmitriy.u@gmail.com (Юманов Дмитрий Николаевич);
sergei4ix@gmail.com (Сергейчик Антон Олегович);
s.v.bolotov@mail.ru (Болотов Сергей Владимирович);
antonbackpa@gmail.com (Михалюто Антон Денисович).

**S. M. FURMANOV, D. N. YUMANOV, A. O. SERGEYCHIK, S. V. BOLOTOV,
A. D. MIKHALYUTO**

**DEVELOPMENT OF ADAPTIVE POWER CONTROL SOFTWARE IN PROJECTION
WELDING PROCESS**

Abstract

A program code has been developed in the LabVIEW graphical programming environment, which makes it possible to use the reference characteristics of the displacement of a movable electrode to build a system for adaptive power control in projection welding. Setting the value of the heating current is carried out taking into account the heating coefficient, which depends on the magnitude of the compressive force of electrodes. The transition to an increase in current from heating to welding occurs when the electrode displacement during heating reaches a certain value, indicating a sufficient degree of heating the projection. The rate of current rise is controlled by the speed sensor coefficient, which depends on the speed of the electrode movement. The welding current is switched off when the projection deformation reaches 80 %...90 % of its initial height, which increases the efficiency of forging the joint.

Keywords:

resistance spot and projection welding, software control tools, adaptive control system, movable electrode displacement, graphic programming, virtual welding cycle controller.

For citation:

Development of adaptive power control software in projection welding process / S. M. Furmanov, D. N. Yumanov, A. O. Sergeychik, S. V. Bolotov, A. D. Mikhalyuto // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 72–80.