

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_107

УДК 621.791.763.2

С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, В. П. Куликов, Д. И. Якубович, А. О. Сергейчик, И. П. Жевнов

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ LABVIEW

S. M. Furmanov, D. N. Yumanov, V. P. Kulikov, D. I. Yakubovich, A. O. Sergeychik, I. P. Zhevnov

LABVIEW GRAPHICAL PROGRAMMING OF THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR PROJECTION WELDING PROCESSES

Аннотация

Разработана система адаптивного управления процессом контактной рельефной сварки, основанная на графическом программировании в среде разработки лабораторных виртуальных приборов LabVIEW. В программу входят следующие блоки: блок цикла сварки, осуществляющий отсчет интервалов времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы, включение электропневмоклапанов привода сжатия электродов и сварочного тока; блок расчета коэффициента регулирования мощности, выполняющий измерение времени включения тиристорov, расчет действующих значений тока, напряжения и мощности, а также коэффициента мощности $\cos \varphi$; блок измерения величины и скорости перемещения подвижного электрода; блок табличного задания мощности и расчета угла управления тиристорами в $(n + 1)$ -м периоде и напряжения управления тиристорным регулятором мощности.

Ключевые слова:

контактная рельефная сварка, адаптивная система управления мощностью, графическое программирование в среде LabVIEW, перемещение подвижного электрода, стабильность механических свойств соединений, технологический цикл сварки.

Для цитирования:

Графическое программирование системы адаптивного управления процессом рельефной сварки в среде LabVIEW / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, В. П. Куликов, Д. И. Якубович, А. О. Сергейчик, И. П. Жевнов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 107–117.

Abstract

A system for adaptive control of the resistance projection welding process has been developed based on graphical programming in the LabVIEW environment of laboratory virtual instrument development. The program includes the following blocks – the block of the welding cycle that calculates time intervals for pre-compression, welding, forging and pauses, and switches electro-pneumatic valves of electrode compression drive and welding current; the block to calculate power control factor, which measures the turn-on time of thyristors and calculates the effective values of current, voltage and power, and the power factor $\cos \varphi$; the block to measure the magnitude and moving speed of the movable electrode; the block that sets tabular power and calculates the control angle of thyristors in the $(n + 1)^{\text{th}}$ period and the voltage for controlling a thyristor power regulator.

Keywords:

resistance projection welding, adaptive power control system, graphical programming in LabVIEW environment, movable electrode movement, stability of mechanical properties of joints, technological welding cycle.

For citation:

LabVIEW graphical programming of the adaptive control system for projection welding processes / S. M. Furmanov, D. N. Yumanov, V. P. Kulikov, D. I. Yakubovich, A. O. Sergeychik, I. P. Zhevnov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 107–117.

Адаптивные системы управления контролируют один или несколько параметров процесса контактной сварки: ток, напряжение, параметры источника питания, электро- и теплопроводность, усилие на электродах, тепловое расширение в ходе сварки и т. д. После контроля адаптивная система управления может регулировать эти параметры.

В производственных средах существует несколько коммерчески доступных систем управления. В целом их можно разделить на три группы [1]:

1) системы контроля и стабилизации по электрическим параметрам: сварочный ток и время его протекания, активная мощность и энергия при сварке, напряжение между электродами и сопротивление межэлектродной зоны;

2) корректирующие системы по параметрам: напряжение питания сети, активное и индуктивное сопротивление сварочного контура, мощность, диаметр электродов;

3) системы контроля физических параметров, таких как температура и перемещение электродов.

Для устранения многих недостатков контактной сварки используются адаптивные контроллеры. Сюда относятся контроллеры с применением эталонных осциллограмм сварочной мощности, интеллектуальные системы управления контактной точечной сваркой, адаптивные контроллеры для снижения эффекта шунтирования тока и т. д.

Функциональная схема разработанной адаптивной системы управления при рельефной сварке, основанной на графическом программировании в среде LabVIEW, представлена на рис. 1 [2–4].

Блок цикла сварки после нажатия на педаль пуска SB1, SB2 (через цифровой триггер PFI 0) осуществляет отсчет интервалов времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы, включение с помощью блока питания и согласования напряжений (БПСН) элект-

ропневмоклапанов привода сжатия электродов (цифровые выходы P0.1, P0.2), а также с помощью тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М – сварочного тока (цифровой триггер PFI 1) (рис. 2) [3–5].

С помощью трансформатора TV2 измеряется сетевое напряжение u_1 , с помощью соответствующих датчиков напряжения и тока – мгновенные значения напряжения между электродами $u_{ээ}$ и сварочного тока i_2 . Далее программно рассчитываются действующие значения (RMS) параметров $U_{ээ}$, I_2 , мощность сварки $P_2 = U_{ээ} \cdot I_2$ и энергия $Q_{ээ}$ (рис. 3).

Блок включения сварочного тока и задания времени его протекания (в полупериодах сетевого напряжения), табличного задания мощности и формирования напряжения управления тиристорного регулятора мощности представлен на рис. 4.

Циклограмма мощности $P_{2зад}$ формируется в виде таблицы для каждого полупериода сетевого напряжения с интервалом 10 мс, с частотой 100 Гц. Количество полупериодов определяется временем протекания сварочного тока. В результате формируется график сигнала управления U_y для блока БУСТ2, на котором отображается форма тока при подогреве и сварке (рис. 5).

Напряжение управления U_y подается с аналогового выхода АОО на управляющий вход 10 В блока ТРМ-1М и задает угол открытия тиристоров α . Начальный угол задается максимальным $\alpha_n = \alpha_{max}$ для настройки системы.

Измерение величины перемещения подвижного электрода $h_{эл}$ осуществляется с помощью цифровых входов PFI 8 (канал А) и PFI 10 (канал В) счетчика str0, расчет скорости перемещения $V_{эл}$ – с помощью дифференцирования сигнала $h_{эл}$ (см. рис.1).

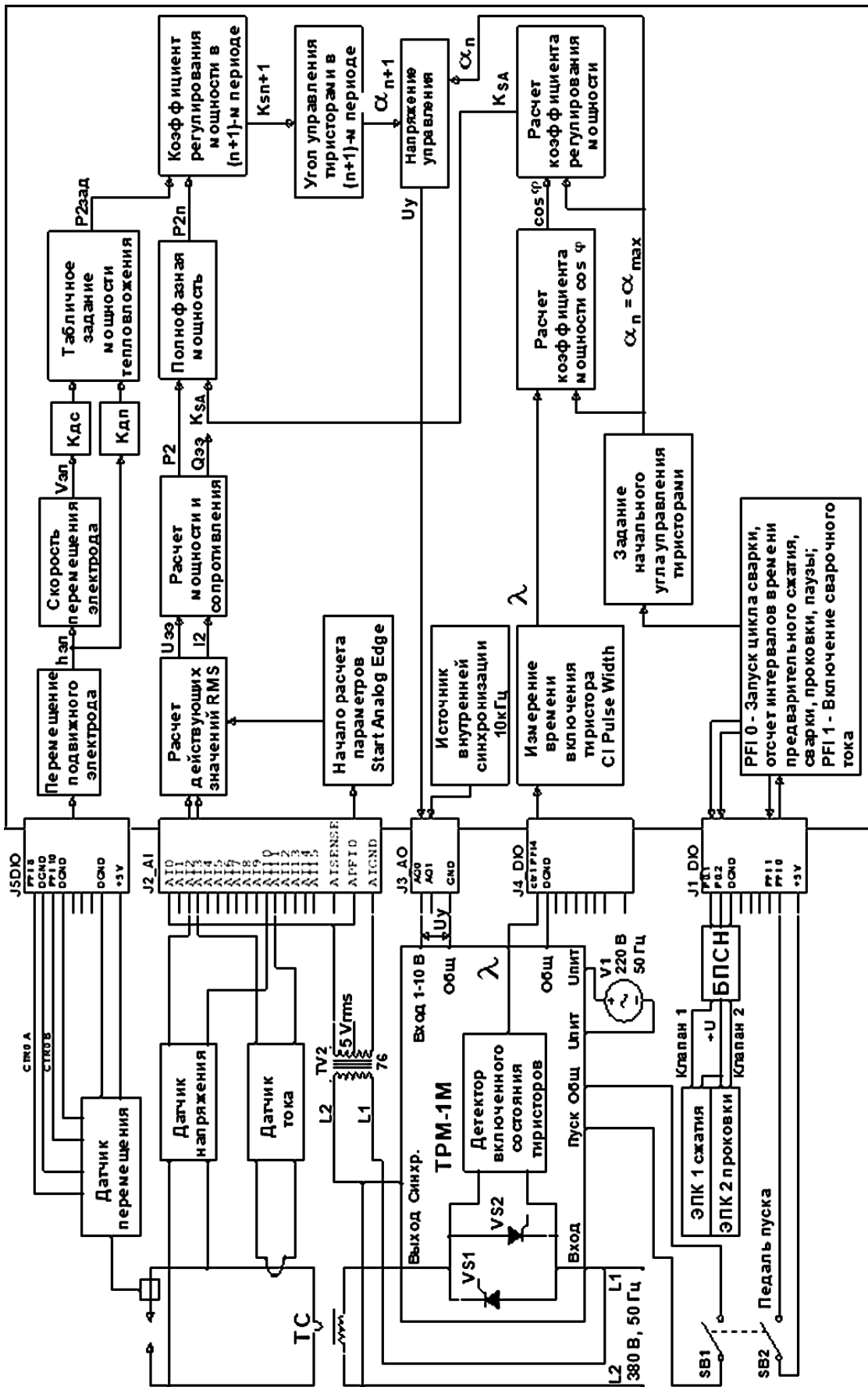


Рис. 1. Функциональная схема системы адаптивного управления процессом рельефной сварки

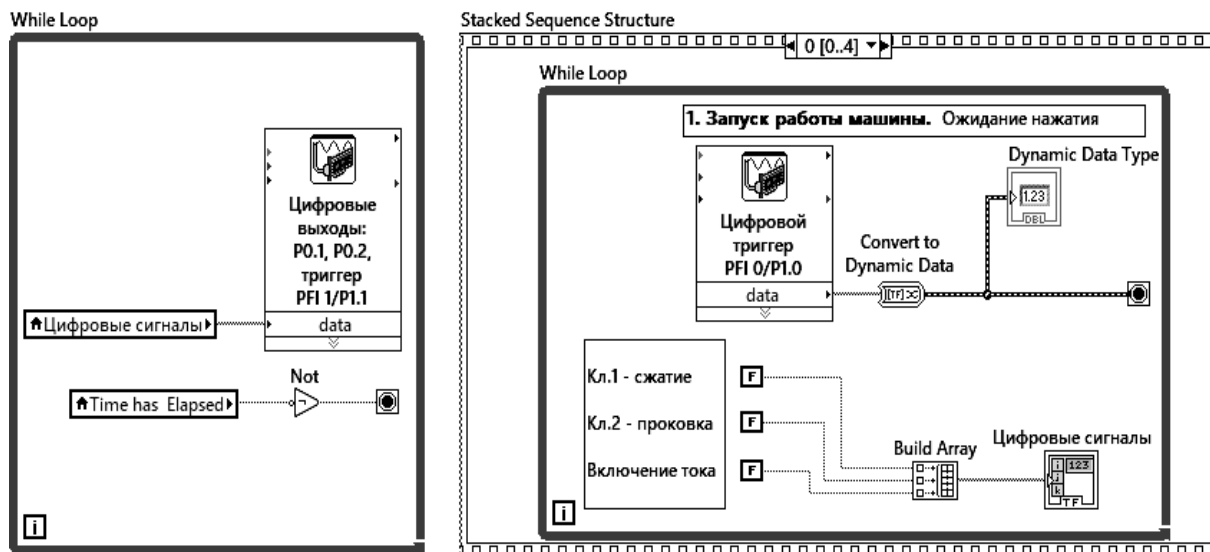


Рис. 2. Запуск блока цикла сварки и формирование цифровых выходов для включения электропневмоклапанов привода сжатия и тиристорного регулятора мощности

На рис. 6 показан сигнал датчика напряжения $u_{ЭЭ}$ и его действующее значение $U_{ЭЭ}$, на рис. 7 – сигнал датчика сварочного тока $i_{СВ}$ и его действующее значение $I_{СВ}$, на рис. 8 – сигнал датчика перемещения $h_{ЭЛ}$ и скорости перемещения $v_{ЭЛ}$ подвижного электрода, на рис. 9 – мощность $P_{ЭЭ}$ и энергия $Q_{ЭЭ}$ в зоне сварки.

С помощью детектора включения тиристоров и счетчика $ctrl\ PFI4$ измеряется ширина импульса λ , необходимая для расчета коэффициента мощности $\cos\varphi = f(\alpha_n, \lambda)$ сварочной машины и коэффициента регулирования мощности $k_{SA} = f(\alpha_n, \cos\varphi)$ по аппроксимирующим зависимостям (см. рис. 1) [5].

После расчета полнофазной мощности $P_{2п} = P_2 / k_{SA}$ определяются коэффициент регулирования мощности k_{Sn+1} в следующем полупериоде ($k_{Sn+1} = P_{2зад} / P_{2п}$), угол включения α_{n+1} и напряжение управления U_{yn+1} , которое подается на вход 1...10 В тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М.

Сущность адаптивного регулирования заключается в том, что таблица задания мощности $P_{2зад}$ может коррек-

тироваться в зависимости от измеренных величины и скорости перемещения подвижного электрода.

Коррекция мощности $P_{2зад}$ происходит на двух этапах: при начальном подогреве соединения током $I_{под}$ и при нарастании тока от подогрева $I_{под}$ к сварочному $I_{СВ}$.

На первом этапе, например, при рельефной сварке винта М8 с потайной головкой (сталь 20) и пластины толщиной 4 мм (сталь СтЗпс) для реализации адаптивного управления были установлены следующие закономерности влияния тока подогрева на величину перемещения подвижного электрода: при токе подогрева $I_{под}$, равном 45 %...55 % от сварочного тока $I_{СВ}$, перемещение электрода $h_{ЭЛ,под}$ должно входить в диапазон 80...260 мкм, что свидетельствует о достаточной степени разогрева рельефа, способствует исключению появления выплесков при нарастании тока до сварочного и стабилизации механических свойств соединений (рис. 10). Заданная мощность $P_{2зад}$ корректируется изменением коэффициента датчика перемещения $K_{дп}$, $P_{2зад} = K_{дп} \cdot P_{под}$.

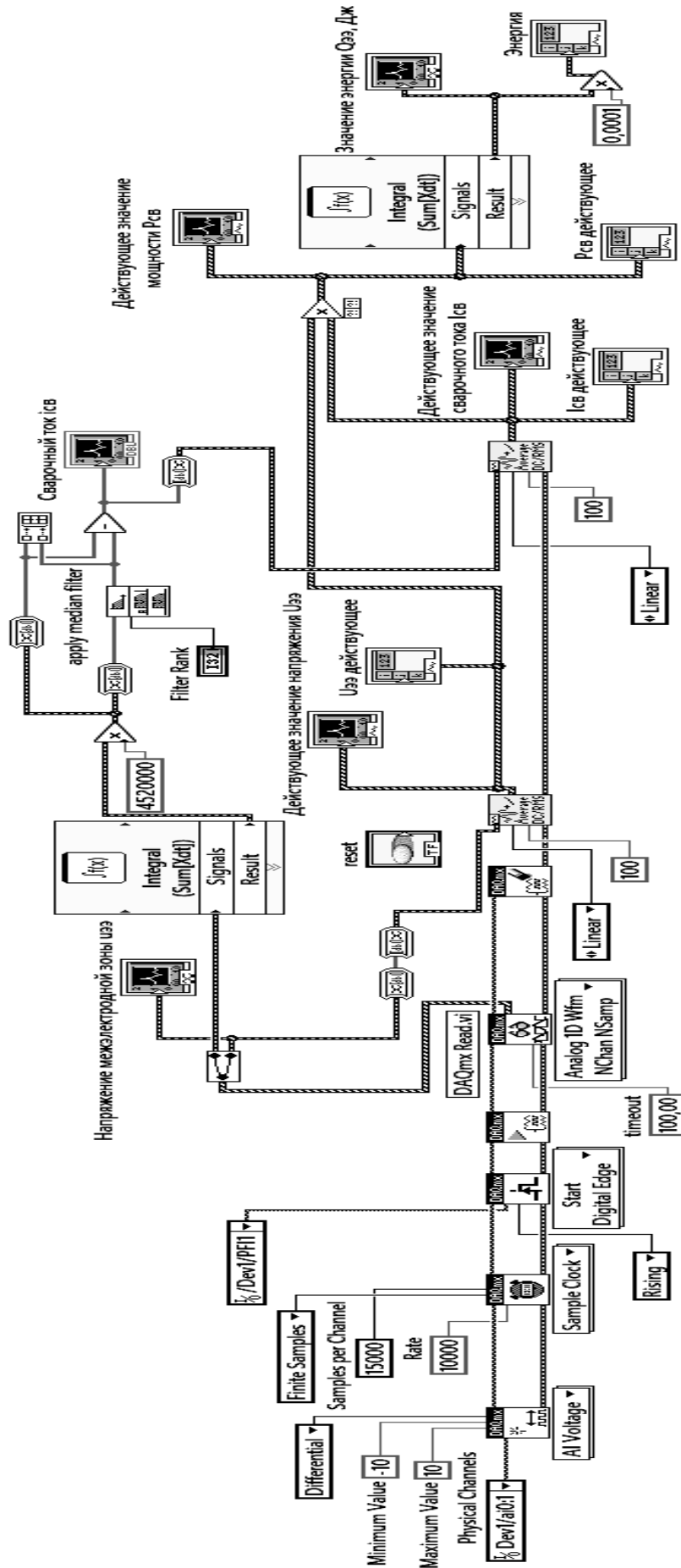


Рис. 3. Блок измерения и расчета действующих значений (RMS) напряжения между электродами $U_{эз}$, сварочного тока $I_{св}$, мощности $P_{св}$ и энергии $Q_{эз}$

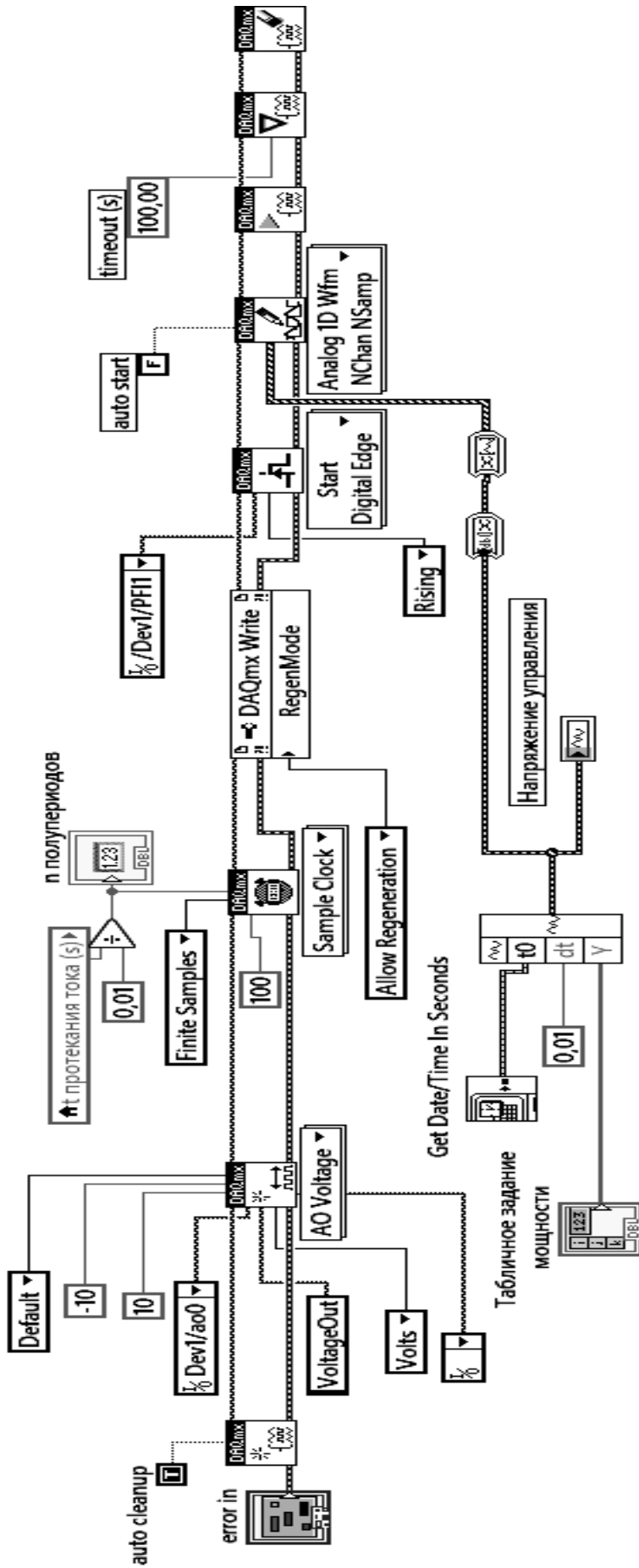


Рис. 4. Блок включения сварочного тока и задания времени его протекания (в полупериодах сетевого напряжения), табличного задания мощности и формирования напряжения управления тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М

Напряжение управления U_y , В

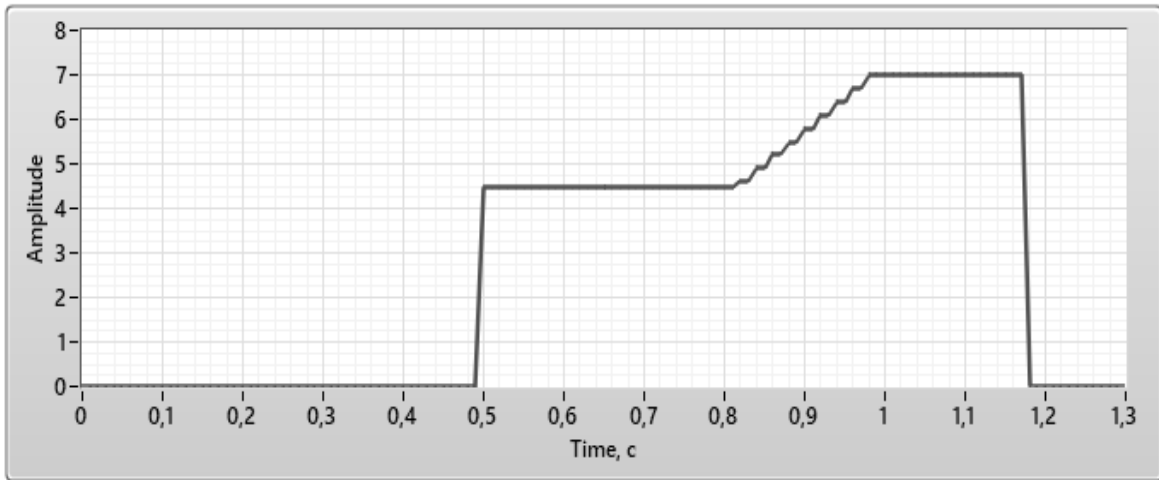
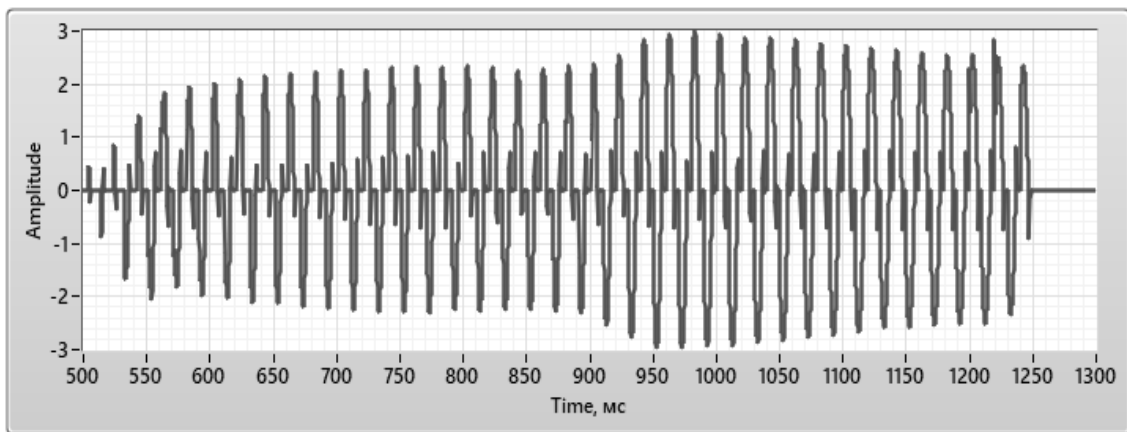


Рис. 5. График сигнала управления U_y для тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М

Напряжение межэлектродной зоны $U_{ээ}$, В



Действующее значение напряжения $U_{ээ}$, В

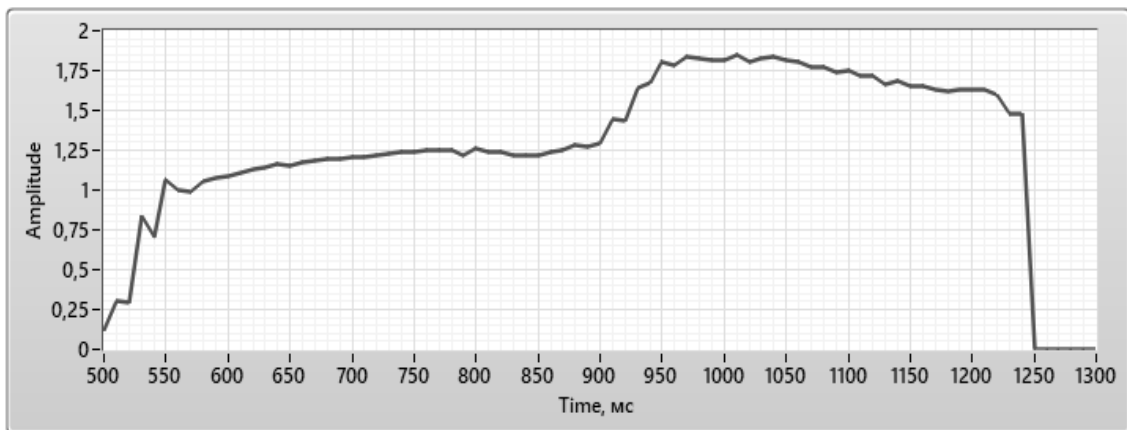
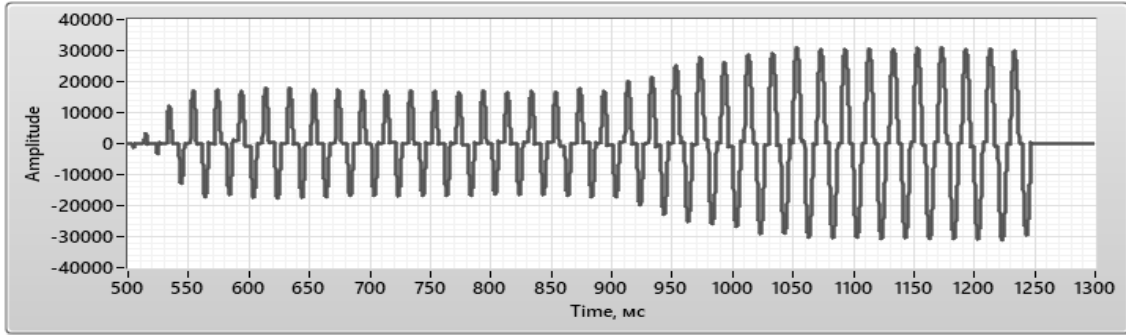


Рис. 6. Сигнал напряжения $u_{ээ}$ и его действующее значение $U_{ээ}$

Сварочный ток $i_{св}$, А



Действующее значение сварочного тока $I_{св}$, А

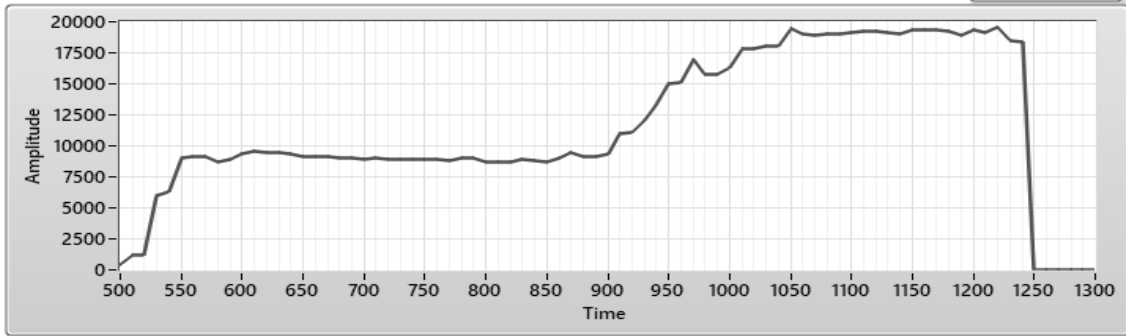
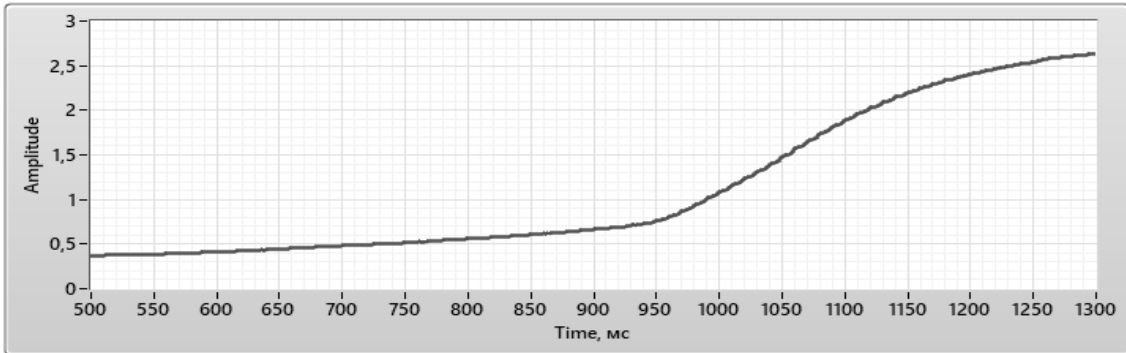


Рис. 7. Сигнал датчика сварочного тока $i_{св}$ и его действующее значение $I_{св}$

Перемещение электрода $h_{эл}$, мм



Скорость перемещения электрода $v_{эл}$, мм/с

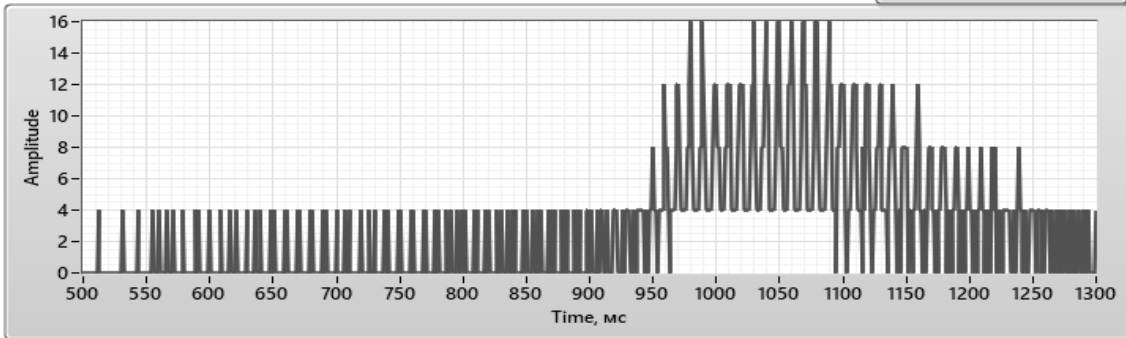
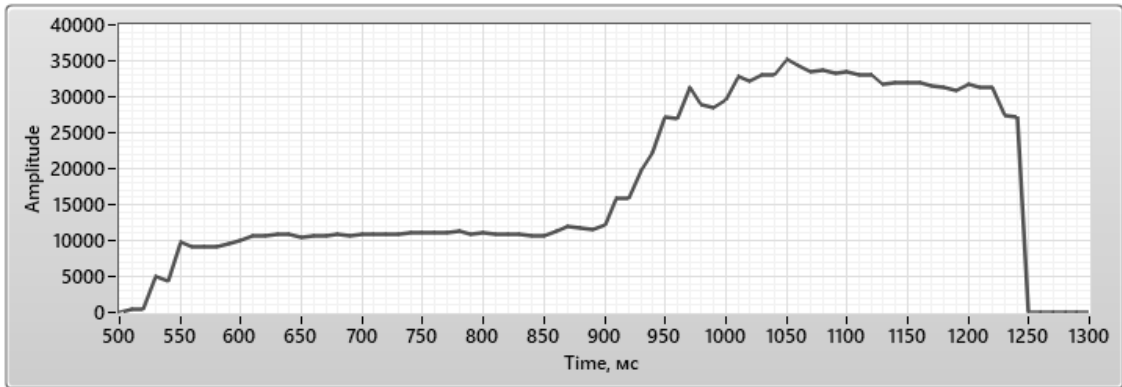


Рис. 8. Сигнал датчика перемещения $h_{эл}$ и скорости перемещения $v_{эл}$ подвижного электрода

Действующее значение мощности $P_{ЭЭ}$, Вт



Значение энергии $Q_{ЭЭ}$, Дж

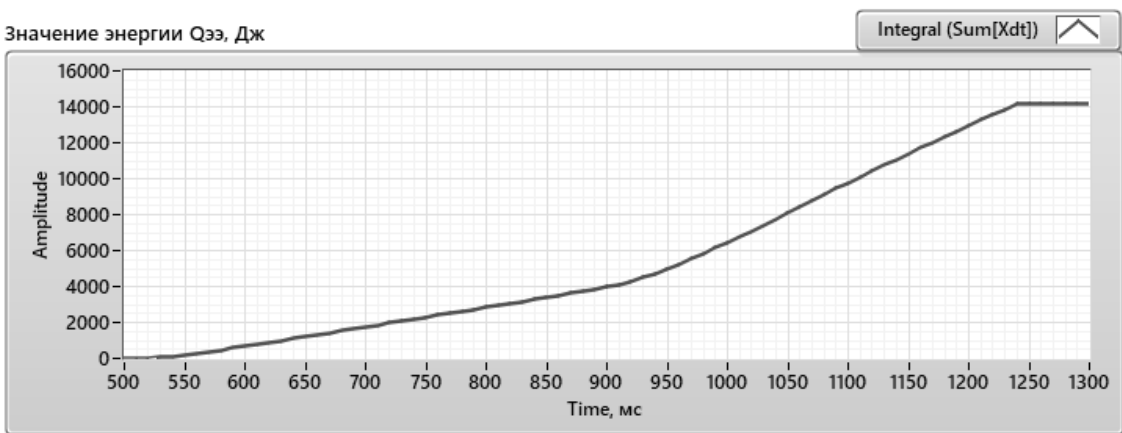


Рис. 9. Действующее значение мощности $P_{ЭЭ}$ и энергия $Q_{ЭЭ}$ в зоне сварки

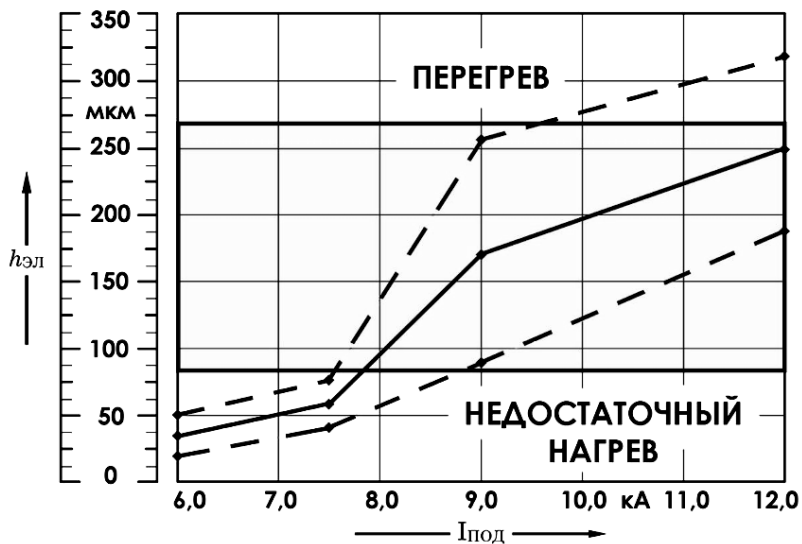


Рис. 10. Зависимость величины перемещения подвижного электрода от тока подогрева

На втором этапе происходит коррекция времени нарастания мощности $\tau_{нар}$ от подогрева $P_{под}$ до максимальной при сварке $P_{св}$ с помощью коэффициента датчика скорости перемещения $K_{дс}$, $P_{2зад} = K_{дс} \cdot P_{нар}$, где $P_{нар}$ – текущее задан-

ное значение нарастающей мощности.

Зависимость максимальной скорости перемещения электрода при сварке с плавным нарастанием тока от подогрева к сварке при изменении времени нарастания $\tau_{нар}$ представлена на рис. 11.

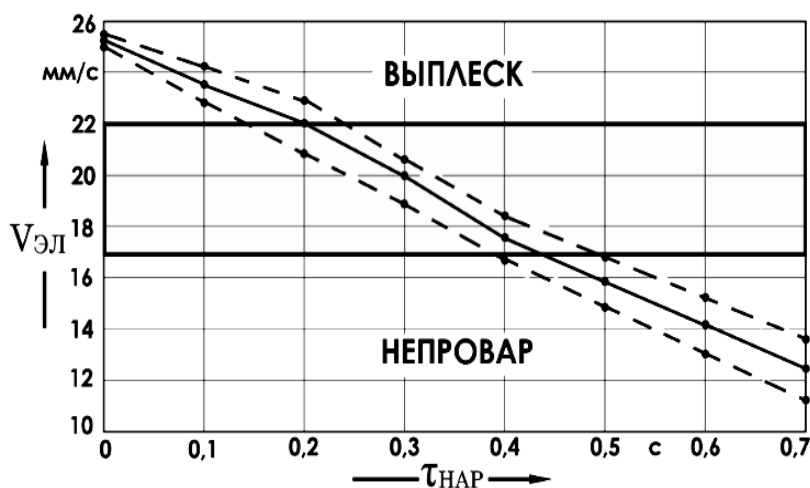


Рис. 11. Зависимость максимальной скорости перемещения электрода от времени нарастания мощности $\tau_{нар}$ от подогрева к сварке

Ранее было подтверждено, что применение сигналов обратной связи по характеристикам перемещения электрода в системе программного управления мощностью при рельефной сварке положительно сказывается на уменьшении вероятности возникновения дефектов формообразования сварной точки и повышении стабильности механических свойств получаемых Т-образных соединений [6].

Таким образом, полученные значения перемещения и скорости перемещения при подогреве и сварке можно использовать как критерии образования качественного соединения при адаптивном регулировании мощности в режиме реального времени.

Выводы

1. Разработанная система адаптивного управления процессом контактной рельефной сварки, основанная на гра-

фическом программировании в среде LabVIEW, включает следующие блоки: блок цикла сварки, блок расчета коэффициента регулирования мощности, блок измерения величины и скорости перемещения подвижного электрода, блок табличного задания мощности $P_{2зад}$, блок расчета угла управления тиристорами в $(n + 1)$ -м периоде и напряжения управления тиристорным регулятором мощности ТРМ-1М.

2. Сущность адаптивного регулирования заключается в том, что таблица задания мощности $P_{2зад}$ может корректироваться в зависимости от измеренных величины и скорости перемещения подвижного электрода на двух этапах: при начальном подогреве соединения током $I_{под}$ и при нарастании тока от подогрева $I_{под}$ к сварочному $I_{св}$.

3. Применение сигналов обратной связи по характеристикам перемещения электрода положительно сказывается на уменьшении вероятности возникнове-

ния дефектов формообразования сварной точки и повышении стабильности механических свойств получаемых

T-образных соединений при адаптивном регулировании мощности рельефной сварки в режиме реального времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
2. **Юманов, Д. Н.** Особенности контактной рельефной сварки T-образных соединений с применением системы программного управления мощностью тепловложения / Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов, С. Ф. Мельников // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 нояб. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 241–246.
3. 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: материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 нояб. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 215–220.
4. Компьютерное управление процессом контактной сварки с помощью среды графического программирования LabVIEW / С. М. Фурманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 54–62.
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. О влиянии параметров режима контактной рельефной сварки с программным управлением мощностью тепловложения на стабильность прочностных показателей соединений / Д. Н. Юманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 3. – С. 118–129.

Статья сдана в редакцию 18 апреля 2023 года

Сергей Михайлович Фурманов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-295-41-67-99. E-mail: furm@mail.ru.

Дмитрий Николаевич Юманов, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-339-12-90-00. E-mail: oitsp.dmitriy.y@gmail.com.

Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Дмитрий Иванович Якубович, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-81-14-35. E-mail: d.i.yakubovich@mail.ru.

Антон Олегович Сергейчик, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-447-88-60-55. E-mail: sergei4ix@gmail.com.

Иван Петрович Жевнов, студент, Белорусско-Российский университет.

Sergei Mikhailovich Furmanov, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-295-41-67-99. E-mail: furm@mail.ru.

Dmitry Nikolayevich Yumanov, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-339-12-90-00. E-mail: oitsp.dmitriy.y@gmail.com.

Valery Petrovich Kulikov, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Belarusian-Russian University.

Dmitry Ivanovich Yakubovich, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-81-14-35. E-mail: d.i.yakubovich@mail.ru.

Anton Olegovich Sergeychik, master's degree student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-447-88-60-55. E-mail: sergei4ix@gmail.com.

Ivan Petrovich Zhevnov, student, Belarusian-Russian University.