

УДК 621.372.83.001.24  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327

Дата подачи статьи: 21.10.19  
2020. Т. 33. № 2. С. 319–327

## **Программное обеспечение автоматизированной системы управления электронно-лучевой сваркой тонкостенных конструкций**

*В.С. Тынченко*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, *vadimond@mail.ru*

*В.Е. Петренко*<sup>1</sup>, аспирант, *dpblra@inbox.ru*

*А.В. Милов*<sup>1</sup>, аспирант, *antnraven@ieee.org*

<sup>1</sup> *Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева, кафедра информационно-управляющих систем, г. Красноярск, 660014, Россия*

В статье предлагается решение проблемы автоматизированного управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки узлов и деталей космических аппаратов. Анализируются особенности технологического процесса электронно-лучевой сварки, в результате чего становится очевидной необходимость его автоматизации с применением программной системы.

Использование разработанной автоматизированной системы позволяет повысить точность задания и воспроизводимость основных технологических параметров в процессе электронно-лучевой сварки, таких как ток луча, накал, фокусировка луча, скорость сварки. Программный продукт представляет собой приложение для операционной системы Windows, совместимое с версиями Windows XP/7/8/8.1/10. Приложение разработано с использованием языка программирования высокого уровня C++ и интегрированной среды разработки Embarcadero RAD Studio XE7. Разработка велась с использованием объектно-ориентированного подхода.

В статье приведены структура программной системы управления, алгоритм ее работы в виде блок-схемы, а также диаграмма экранных форм. Представленное в рамках данной статьи программное решение содержит функционал задания таких параметров технологического процесса электронно-лучевой сварки, как скорость сварки, ток пуска, время нарастания, время спада. ПО также решает задачу контроля ряда параметров: ускоряющее напряжение, скорость сварки, ток пучка, ток фокусировки и ток накала. Целевые параметры технологического процесса задаются пользователем вручную, а управление самим процессом реализуется в программном виде. Кроме того, возможен просмотр графиков данных параметров технологического процесса.

Апробация решения проводилась в рамках серии стендовых испытаний, результаты которых показали достаточно высокое качество управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки.

**Ключевые слова:** *автоматизированная система, автоматизированное управление, детали космических аппаратов, электронно-лучевая сварка, программный продукт, фокусировка луча.*

В современном мире достижения аэрокосмической промышленности находят все более широкое применение. Рост потребности в аэрокосмической технике в различных областях деятельности обуславливает необходимость разработки и производства все более совершенных космических летательных аппаратов различного назначения. Технологии производства оборудования для аэрокосмической отрасли тоже не стоят на месте. С развитием сложности элементной базы оборудования космических летательных аппаратов повышаются требования к технологичности, точности и качеству технологического процесса производства аэрокосмического оборудования. Раньше во многих технологических процессах произ-

водства аэрокосмической техники широко применялся метод аргонодуговой сварки, теперь же используется более точный и наукоемкий метод электронно-лучевой сварки.

Электронно-лучевая сварка уже прочно вошла в технологический цикл производства различных видов техники. В аэрокосмическом машиностроении такой метод находит широкое применение в силу незначительных тепловых деформаций соединяемых деталей вследствие кратковременности теплового воздействия и малого объема литого металла. Основой электронно-лучевой сварки является использование тепловой энергии, выделяющейся при торможении остросфокусированного потока электронов, ускоренных до высоких уровней

энергии. Само явление термического воздействия электронных пучков на твердые материалы было известно еще в XIX веке, однако развитие данный источник нагрева получил только во второй половине XX века. Это связано с развитием вакуумной техники и электронной оптики.

Широкие возможности электронно-лучевой сварки позволяют использовать данную технологию для производства различных видов продукции. Например, авторами работы [1] технология электронно-лучевой сварки используется для получения канала подогрева лопаток входного направляющего аппарата газовых турбин. Свое применение электронно-лучевая сварка нашла также в ядерной промышленности. Проведенные авторами работы [2] исследования показали, что при электронно-лучевой сварке монокристаллов вольфрама обеспечиваются условия для эпитаксиальной кристаллизации материала шва, в результате чего его параметры соответствуют параметрам свариваемых монокристаллов. Таким образом, получается полая моногранная трубка, которая в дальнейшем используется для производства катода термоэмиссионного преобразователя. Для повышения качества технологического процесса электронно-лучевой сварки многими авторами было проведено математическое моделирование данного технологического процесса в разных режимах и с разными материалами [3–7]. Для моделирования технологического процесса электронно-лучевой сварки используются как классические методы, основанные на уравнениях теплопроводности [8–10], так и интеллектуальные [11]. Современные методы управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке представлены в работах [12, 13]. К таким методам, в частности, относятся импульсная модуляция тока электронного луча, осцилляция луча с различного вида разверткой по стыку сварного соединения, многофокусная сварка.

### Структура и алгоритмы работы ПО

Программный продукт реализован в виде оконного приложения для операционных систем линейки Windows, совместимого с версиями Windows XP/7/8/8.1/10. Инструментом для реализации приложения выбран язык программирования C++, методологией разработки – объектно-ориентированный подход [14–16], средой разработки – C++ Builder XE от компании Embarcadero.

Для работы с COM-портами использовались средства WinApi [17, 18], для работы с платой сборки данных PCI1710 – сторонняя библиотека bdaqctrl.h [19].

Назначение программного продукта заключается в контроле основных параметров технологического процесса (ускоряющее напряжение, скорость сварки, ток электронного пучка, ток фокусировки, ток накала) и в программном задании значений таких параметров, как скорость сварки, ток пучка, время нарастания, время спада.

Структурная схема программного продукта представлена на рисунке 1.

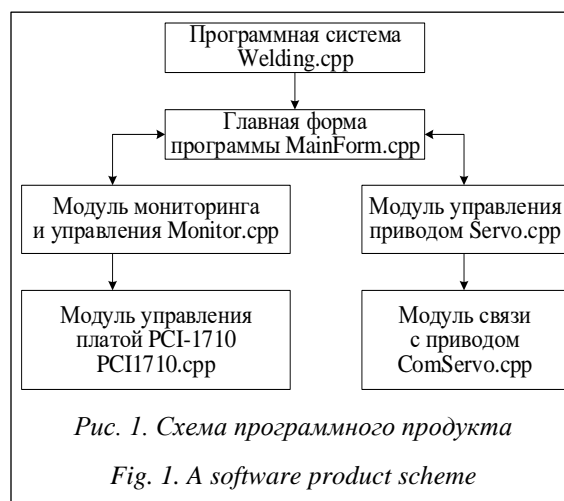


Рис. 1. Схема программного продукта

Fig. 1. A software product scheme

Как видно из рисунка, программная система включает в себя пять модулей:

- основной файл программной системы Welding.cpp реализует основную функцию системы, отвечающую за запуск, функционирование и завершение работы программной системы;
- главная форма MainForm.cpp реализует графический интерфейс пользователя программной системы для управления электронно-лучевой сваркой;
- модуль мониторинга и управления Monitor.cpp реализует алгоритмы управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки;
- модуль управления платой PCI1710 PCI1710.cpp предназначен для обработки данных со средств измерения и управления исполнительными механизмами установки электронно-лучевой сварки;
- модуль управления сервоприводом Servo.cpp и модуль связи с приводом ComServo.cpp предназначены для реализации взаимодействия системы с сервоприводом.

В программной системе реализованы три пользовательских класса: ICluste, Servo, Comport.

Класс ICluste реализует алгоритмы управления параметрами технологического процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения и позволяет:

- обеспечивать ввод электронного пучка по заданным параметрам времени ввода и порога уровня пучка;
- обеспечивать вывод пучка по заданным параметрам времени ввода и порога понижения уровня электронного пучка;
- обеспечивать стабилизацию тока пучка по параметру тока пучка и времени стабилизации;
- возвращать текущее измеренное значение тока пучка;
- устанавливать необходимое значение тока пучка;
- прерывать выполнение алгоритмов ввода, стабилизации или вывода пучка;
- обеспечивать переключение управления током пучка между ручным и автоматическим режимами.

Класс Servo реализует алгоритмы настройки и управления сервоприводом и позволяет:

- настраивать состояние портов контроллера сервопривода;
- возвращать текущее состояние портов контроллера сервопривода;
- возвращать логическое значение, указывающее на режим управления сервоприводом: ручной или автоматический;
- обеспечивать запуск или остановку сервопривода в зависимости от логического аргумента;
- получать значения текущей скорости вращения вала сервопривода и числа оборотов в минуту;
- обеспечивать сглаживание значений скорости, полученных контроллером сервопривода;
- переключать режим управления сервоприводом с ручного на автоматический и наоборот;
- возвращать текущее значение режима работы сервопривода.

Класс Comport реализует методы взаимодействия системы и контроллера сервопривода по COM-порту.

На рисунке 2 представлена блок-схема работы программной системы. На начальном

этапе после запуска программы происходит открытие COM-порта, который используется для обмена данными с приводом. Далее производятся инициализация платы PCI-1710 и ее конфигурирование под программную систему.

После успешной конфигурации платы происходит обмен данными с оборудованием с целью сброса уставок токов луча и фокусировки. Далее происходит обращение в память с целью загрузки последних сохраненных параметров технологического процесса из советуемого файла.

В случае неудачи будут установлены стандартные параметры процесса. По окончании всех начальных операций инициализации на экран выводится форма, которая предоставляет оператору графический интерфейс для работы с системой. Оператор может начать или прекратить процесс мониторинга за технологическими параметрами процесса, данная операция сбрасывает уставки в аппаратных блоках.

Установка параметров, которые будут использованы после запуска сварки, производится путем предварительного задания их оператором с помощью внешних органов управления системой с последующим нажатием кнопки «Принять параметры».

Момент исполнения алгоритма управления током пучка наступает после запуска процесса сварки. Блок-схема алгоритма управления током пучка представлена на рисунке 3.

Как видно из блок-схемы, на первоначальном этапе производится считывание заданных оператором параметров сварки. Кроме того, используются предварительные установки, не показанные в данной блок-схеме и определяемые ранее в отдельной форме программы.

Далее вызывается подпрограмма проверки готовности системы к работе. По ее результатам либо, если проверка не пройдена, выводится служебное сообщение об ошибочном задании параметров, их нехватке или о неисправности какого-либо элемента системы, предоставляя информацию оператору о характере сбоя, который необходимо устранить, либо, если проверка успешна, управление передается следующему участку программы.

После успешной проверки вызываются подпрограммы управления приводом и током накала пушки, которые исполняются как отдельные алгоритмы. После инициализации их работы вызывается подпрограмма ввода тока электронного пучка. Эта подпрограмма использует уставки времени ввода и необходимого значения тока пучка. Она исполняется до

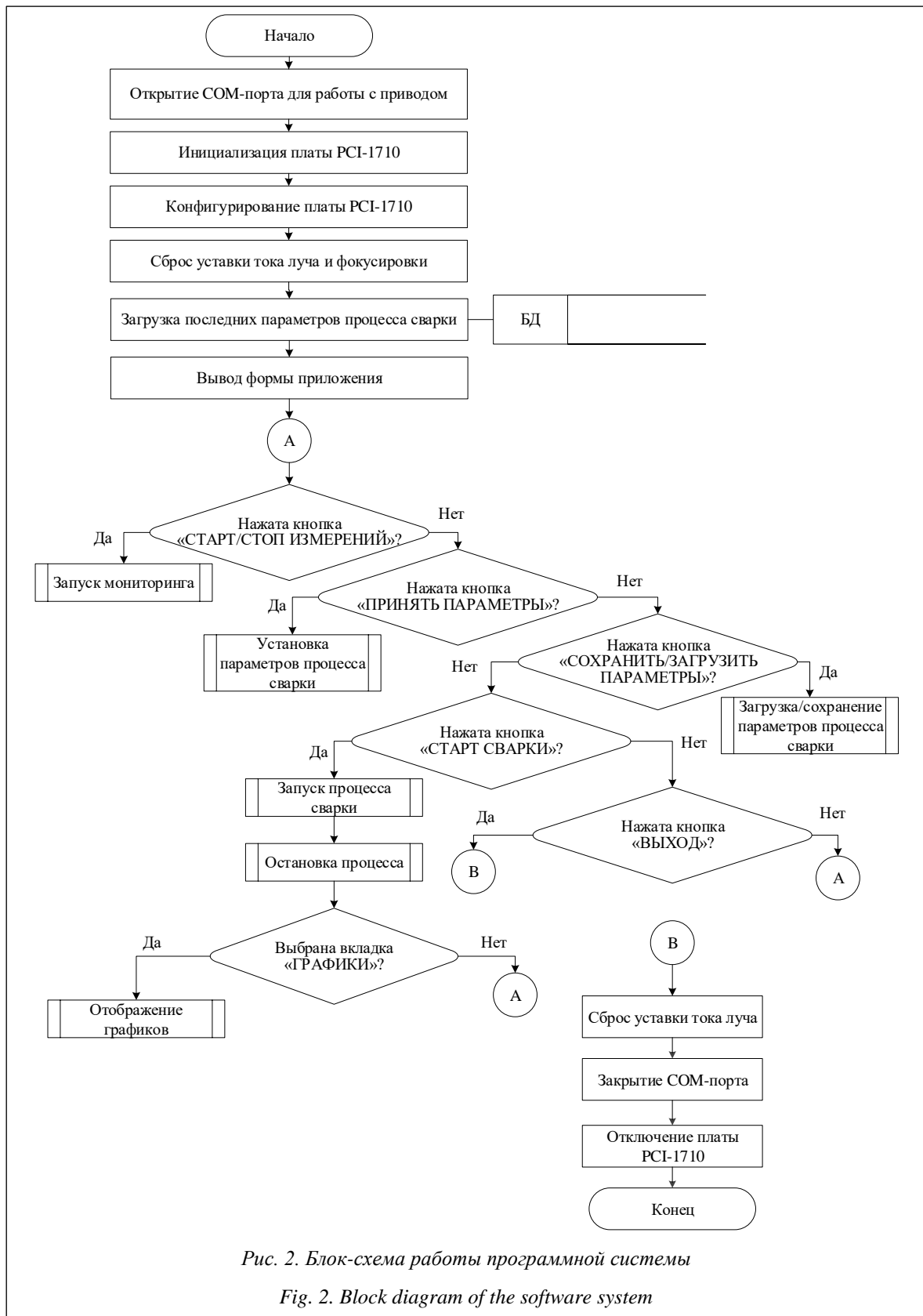


Рис. 2. Блок-схема работы программной системы

Fig. 2. Block diagram of the software system

достижения заданного уровня тока, передавая управление в другие блоки управления после

очередного цикла управления. По выполнении условия завершения ввода пучка система пере-

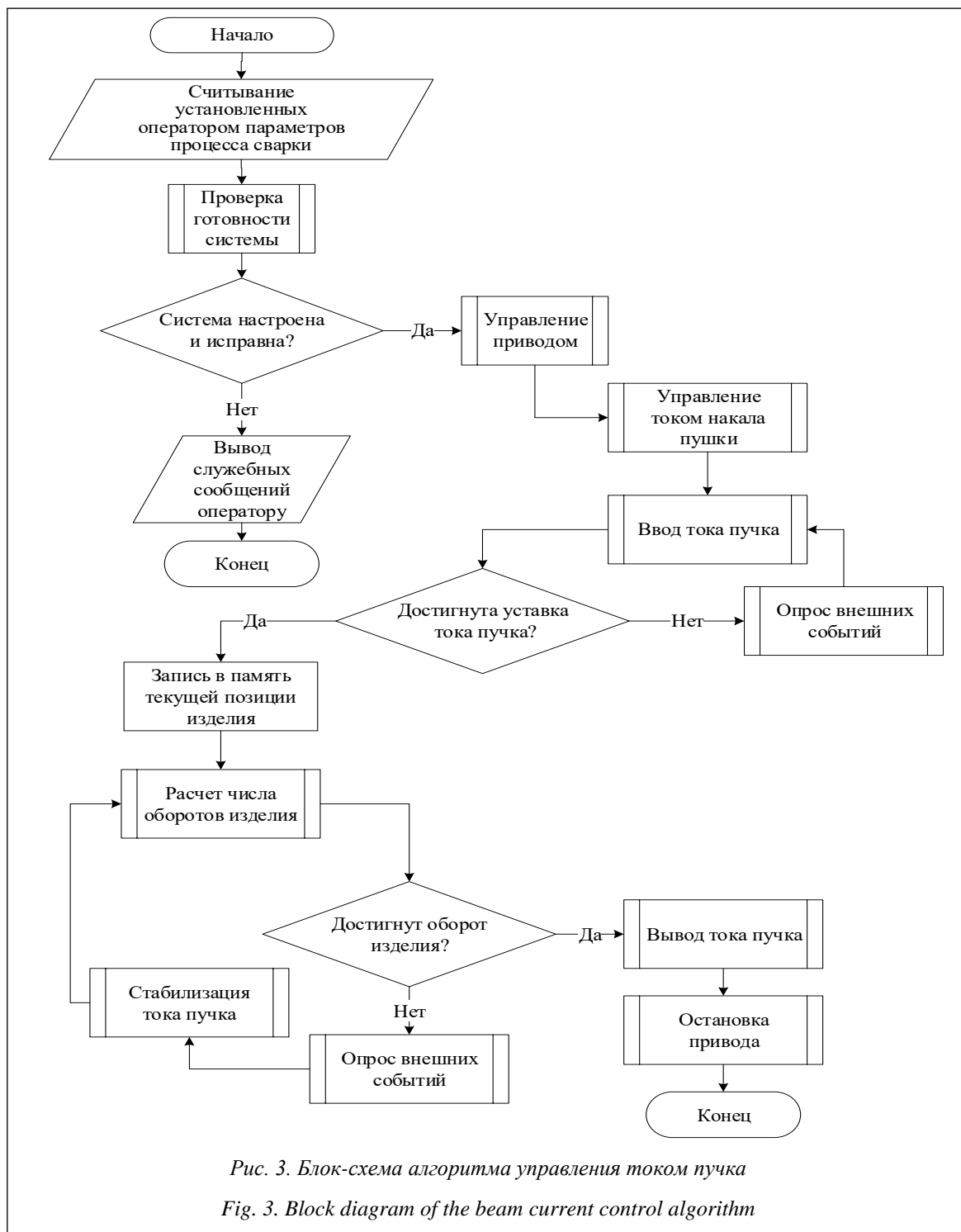


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления током пучка

Fig. 3. Block diagram of the beam current control algorithm

ходит в режим его стабилизации на заданном уровне, а также отсчета оборота свариваемого изделия. Текущее положение изделия записывается в память, затем вызывается подпрограмма расчета числа оборотов, после которой производится проверка условия перехода в режим вывода пучка. Если оборот изделия не достигнут, управление передается внешним под-

программам, далее вызывается подпрограмма стабилизации пучка. Так повторяется до достижения условия окончания режима стабилизации пучка. После достижения одного оборота изделия вызывается подпрограмма, обеспечивающая режим вывода пучка по заданному параметру времени спада. После вывода электронного пучка инициализируются остановка

привода и завершение работы алгоритма.

На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма ввода/вывода электронного луча.

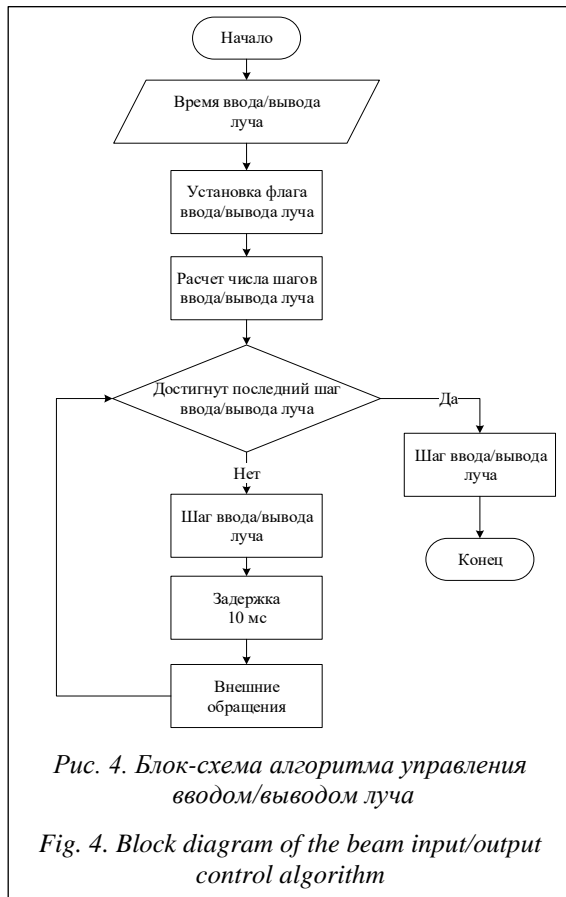


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления вводом/выводом луча

Fig. 4. Block diagram of the beam input/output control algorithm

В качестве входных данных для алгоритма используется время ввода/вывода, на его основе определяется количество шагов, необходимых для выполнения операций. Каждому шагу ввода и вывода сопоставляется свое значение уставки. Выставляются соответствующие флаги состояния процесса.

Далее происходит оценка текущего шага процесса и на его основе определяется окончание процесса. Если процесс продолжается, делается очередной шаг ввода или вывода, происходит задержка в 10 мс, управление передается внешним алгоритмам. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут шаг, указывающий на окончание процесса ввода или вывода луча. Далее происходит сброс флагов и выход из алгоритма.

### Описание работы с программной системой

Запуск программы осуществляется посредством исполнения файла Welding.exe. На ри-

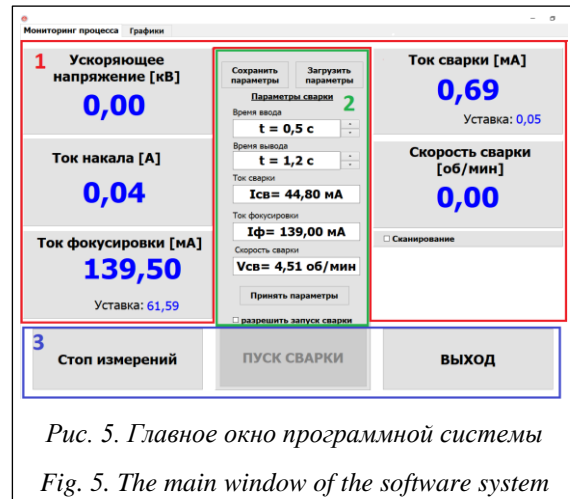


Рис. 5. Главное окно программной системы

Fig. 5. The main window of the software system

сунке 5 представлен внешний вид программы, соответствующий состоянию после запуска. Элементы окна программы разделены на три группы.

Группу 1 составляют элементы, отображающие текущие параметры процесса сварки: ускоряющее напряжение, ток накала, скорость сварки, ток сварки, ток фокусировки.

Группа 2 содержит информацию о параметрах, которые будут использованы при запуске процесса сварки, и элементы управления, позволяющие их изменить.

В группу 3 входят управляющие кнопки «Старт/стоп измерений», «Пуск/стоп сварки», «Выход».

При нажатии кнопки «Старт измерений» происходит сброс уставок в аппаратных блоках управления током пучка и током фокусировки, соответственно, повторное нажатие на данную кнопку, но уже с названием «Стоп измерений», останавливает слежение за состоянием процесса.

Перед закрытием (кнопка «Выход») производится сброс уставок в аппаратных блоках управления током пучка и током фокусировки.

С помощью внешнего задания оператором выставляются параметры технологического процесса («Принять параметры»), после чего происходит изменение уставок, которые будут использованы после запуска сварки. Время ввода и вывода электронного луча задается оператором вручную путем нажатия управляющих кнопок, находящихся в непосредственной близости от поля отображения данных параметров с шагом 0,1 с.

Текущие уставки процесса сварки с указанием текущей даты и времени записываются в файл (кнопка «Сохранить»), при этом создается дополнительный файл, из которого будут

загружены параметры процесса при следующем запуске программы. При нажатии кнопки «Загрузить» откроется окно, позволяющее выбрать один из ранее сформированных файлов с параметрами процесса сварки. После установки пункта «Разрешить запуск сварки» оператору предоставляется возможность запуска сварки.

Вкладка «Графики» (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2020-2/2020-2-dop/13.jpg>) позволяет просматривать параметры процесса в графическом виде как на этапе ручного управления процессом, так и после запуска в автоматическом режиме.

В последнем случае отслеживание процесса начинается непосредственно после его запуска и до окончания.

Эффективность автоматизированной системы была проверена в рамках стендовых испытаний. Результаты испытаний показали, что эффективность автоматизированной системы

управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения полностью удовлетворяет заявленным требованиям.

### Заключение

В данной работе представлена разработка системы автоматизации электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения. Программное решение содержит функционал настройки основных параметров технологического процесса электронно-лучевой сварки, кроме того, возможен просмотр графиков данных параметров технологического процесса.

Апробация предложенного решения проводилась в рамках стендовых испытаний, показавших высокое качество управления технологическим процессом электронно-лучевой сварки тонокостенных конструкций.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки в рамках научного проекта № 19-48-240007.*

### Литература

1. Шаронов Н.И. Применение электронно-лучевой сварки в турбостроении // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2010. № 3. С. 143–149.
2. Ластовирия В.Н., Новокрещенов В.В., Родякина Р.В. Использование электронно-лучевой сварки для создания термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) из монокристаллов вольфрама // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 3. С. 27–35.
3. Младенов Г.М., Колева Е.Г., Бельский В.Я., Трушников Д.Н. Моделирование и оптимизация электронно-лучевой сварки сталей // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2014. Т. 16. № 4. С. 7–21.
4. Бельский В.Я., Трушников Д.Н., Пискунов А.Л., Лялин А.Н. Динамическая модель электронно-лучевой сварки со сквозным проплавлением // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2011. Т. 13. № 3. С. 72–84.
5. Саломатова Е.С., Трушников Д.Н., Цаплин А.И., Бельский В.А., Младенов Г.М. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке с динамическим позиционированием электронного пучка // Изв. ТулГУ. Технич. науки. 2015. № 6. С. 124–133.
6. Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М., Колева Е.Г. Построение тепловых моделей при электронно-лучевой сварке методом функций Грина // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 3. С. 49–74.
7. Пермяков Г.Л., Ольшанская Т.В., Бельский В.Я., Трушников Д.Н. Моделирование электронно-лучевой сварки для определения параметров сварных соединений разнородных материалов // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 4. С. 48–58.
8. Denlinger E.R. Thermo-mechanical modeling of large electron beam builds. Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing. Butterworth-Heinemann Publ., 2018, pp. 167–181.
9. Raj R.A., Anand M.D. Modeling and prediction of mechanical strength in electron beam welded dissimilar metal joints of stainless steel 304 and copper using grey relation analysis. Engineering & Technology, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 198–201.
10. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar M. A perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process. Materials Today: Proceedings, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817.
11. Das D., Pratihari D.K., Roy G.G., Pal A.R. Phenomenological model-based study on electron beam welding process, and input-output modeling using neural networks trained by back-propagation algorithm,

genetic algorithms, particle swarm optimization algorithm and bat algorithm. *Applied Intelligence*, 2018, vol. 48, no. 9, pp. 2698–2718.

12. Tadano S., Hino T., Nakatani Y. A modeling study of stress and strain formation induced during melting process in powder-bed electron beam melting for Ni superalloy. *J. of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 257, pp. 163–169.

13. Das D., Pratihar D.K., Roy G.G. Cooling rate predictions and its correlation with grain characteristics during electron beam welding of stainless steel. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, no. 5–8, pp. 2241–2254. DOI: 10.1007/s00170-018-2095-6.

14. Stroustrup B. *The C++ programming language*. Pearson Education Publ., 2000, 1040 p.

15. Dattatri K., Foreword By-Gamma E. *C++: effective object-oriented software construction*. Prentice Hall PTR, 1999, 755 p.

16. Balagurusamy E. *Object Oriented Programming with C++*. Tata McGraw-Hill Education, 2001, 533 p.

17. Магда Ю.С. Программирование последовательных интерфейсов. СПб, 2009. 304 с.

18. Жмудь В.А., Трубин М.В., Трубин И.В. Обмен данными между компьютером и микроконтроллером STM32F100 по последовательному интерфейсу связи RS-232 // *Автоматика и программная инженерия*. 2015. № 1. С. 45–51.

19. Тынченко В.С., Бочаров А.Н., Лаптенко В.Д., Серегин Ю.Н., Злобин С.К. Программное обеспечение технологического процесса пайки волноводных трактов космических аппаратов // *Программные продукты и системы*. 2016. № 2. С. 128–134.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327

Received 21.10.19  
2020, vol. 33, no. 2, pp. 319–327

### Software for an automated control system for electron beam welding of thin-walled structures

V.S. Tynchenko<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vadimond@mail.ru

V.E. Petrenko<sup>1</sup>, Postgraduate Student, dpblra@inbox.ru

A.V. Milov<sup>1</sup>, Postgraduate Student, antnraven@ieee.org

<sup>1</sup>Academician M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Information-Control Systems Chair, Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

**Abstract.** The paper proposes a solution to the automated control problem of the technological process for electron beam welding of components and spacecraft parts. There is a specific analysis of the electron beam welding process, which makes it obvious that it needs to be automated using a software system.

Using the developed automated system allows to increase the problem accurately and the main technological parameters reproducibility of the electron beam welding process, such as beam current, glow, beam focusing, welding speed. The software product is an application for the Windows operating system that is compatible with versions of Windows XP/7/8/8.1/10.

The application was by using the high-level programming language C++ and the integrated development environment Embarcadero RAD Studio XE7. Development was with using an object-oriented approach.

The paper shows the software control system structure, its operation algorithm in the block diagram form, as well as a screen form diagram. The software solution presented in the framework of this paper contains the functionality for setting such parameters of the electron beam welding process as the welding speed, start current, rise time, and fall time. The software also solves the controlling parameter problems such as accelerating voltage, welding speed, beam current, focusing current, and glow current. The target process parameters are manually set by the user, and the process control is in software. In addition, it is possible to view the process parameter data graphs. Solution testing was as part of a bench test series, which results showed a fairly high-quality control of the electron beam welding technological process.

**Keywords:** automated system, automated control, spacecraft parts, electron beam welding, software product, beam focusing.

**Acknowledgements.** The reported study was funded by RFBR, Government of the Krasnoyarsk Territory and the Regional Science Foundation, project no. 19-48-240007.



### References

1. Sharonov N.I. Electron beam welding in turbine construction. *St. Petersburg Polytech. Univ. J. of Eng. Sci. and Tech.*, 2010, no. 3, pp. 143–149 (in Russ.).
2. Lastoviryia V.N., Novokreshchenov V.V., Rodyakina R.V. Using of electron beam welding to create thermionic converters from tungsten monocrystals. *Global Nuclear Safety*, 2015, no. 3, pp. 27–35 (in Russ.).
3. Mladenov G.M., Koleva E.G., Belenky V.Ya., Trushnikov D.N. Modeling and optimization of electron beam steel welding. *Bull. PNRPU. Mech. Eng., Mater. Sci.*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 7–21 (in Russ.).
4. Belenky V.Ya., Trushnikov D.N., Piskunov A.L., Lyalin A.N. The dynamic model of electron beam welding with through penetration. *Bull. PNRPU. Mech. Eng., Mater. Sci.*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 72–84 (in Russ.).
5. Salomatova E.S., Trushnikov D.N., Tsaplin A.I., Belenky V.Ya., Mladenov G.M. Simulation of evaporation processes at “multi-keyhole” technology in electron beam welding. *Bull. TulSU. Tech. Sci.*, 2015, no. 6, pp. 124–133 (in Russ.).
6. Olshanskaya T.V., Fedoseeva E.M., Koleva E.G. Construction of thermal models in electron beam welding using Green's function method. *Bull. PNRPU*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 49–74 (in Russ.).
7. Permyakov G.L., Ol'shanskaya T.V., Belenky V.Ya., Trushnikov D.N. Electron beam welding simulation for determining the parameters of welded joints of dissimilar materials. *Bull. PNRPU. Mech. Eng., Mater. Sci.*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 48–58. (in Russ.).
8. Denlinger E.R. *Thermo-Mechanical Modeling of Large Electron Beam Builds. Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing*. Butterworth-Heinemann Publ., 2018, pp. 167–181.
9. Raj R.A., Anand M.D. Modeling and prediction of mechanical strength in electron beam welded dissimilar metal joints of stainless steel 304 and copper using grey relation analysis. *Engineering & Technology*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 198–201.
10. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar M. A perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817.
11. Das D., Pratihari D.K., Roy G.G., Pal A.R. Phenomenological model-based study on electron beam welding process, and input-output modeling using neural networks trained by back-propagation algorithm, genetic algorithms, particle swarm optimization algorithm and bat algorithm. *Applied Intelligence*, 2018, vol. 48, no. 9, pp. 2698–2718.
12. Tadano S., Hino T., Nakatani Y. A modeling study of stress and strain formation induced during melting process in powder-bed electron beam melting for Ni superalloy. *J. of Materials Processing Technology*, 2018, no. 257, pp. 163–169.
13. Das D., Pratihari D.K., Roy G.G. Cooling rate predictions and its correlation with grain characteristics during electron beam welding of stainless steel. *The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, no. 5–8, pp. 2241–2254. DOI: 10.1007/s00170-018-2095-6.
14. Stroustrup B. *The C++ Programming Language*. Pearson Education Publ., 2000, 1040 p.
15. Dattatri K. *Foreword By-Gamma E. C++: Effective Object-Oriented Software Construction*. Prentice Hall PTR, 1999, 755 p.
16. Balagurusamy E. *Object Oriented Programming with C++*. Tata McGraw-Hill Education, 2001.
17. Magda Yu.S. *Serial Programming*. St. Petersburg, 2009, 304 p. (in Russ.).
18. Zhmud' V.A., Trubin M.V., Trubin I.V. Data exchange between the computer and the stm32f100 microcontroller via the RS-232 serial communication interface. *Automatics & Software Engineering*, 2015, no. 1, pp. 45–51 (in Russ.).
19. Tynchenko V.S., Bocharov A.N., Laptinok V.D., Seregin Yu.N., Zlobin S.K. The software of technological process of soldering spacecrafts' waveguides. *Software & Systems*, 2016, no. 2, pp. 128–134 (in Russ.).

### Для цитирования

Тынченко В.С., Петренко В.Е., Милов А.В. Программное обеспечение автоматизированной системы управления электронно-лучевой сваркой тонкостенных конструкций // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 319–327. DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327.

### For citation

Tynchenko V.S., Petrenko V.E., Milov A.V. Software for an automated control system for electron beam welding of thin-walled structures. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 319–327 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.130.319-327.