

**Полуянович Николай Константинович** – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

**Дубяго Марина Николаевна** – e-mail: w\_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

**Poluyanovich Nikolay Konstantinovich** – Southern Federal University; e-mail: w\_m88@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

**Dubyago Marina Nikolaevna** – e-mail: w\_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 621.372.83.001.24

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-46-56

**В.С. Мараев**

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ**

*Работа посвящена исследованию и автоматизации математического моделирования процесса нагрева элементов тонкостенного алюминиевого волноводного тракта при отработке технологической процедуры индукционной пайки. В статье проводится обзор метода математического моделирования технологического процесса индукционной пайки. В качестве математической модели нагрева волноводного тракта с целью отработки технологического процесса индукционной пайки используется мгновенный источник нагрева в плоском стержне. В рамках данной работы была спроектирована и реализована функциональная автоматизированная подсистема математического моделирования технологического процесса индукционной пайки тонкостенных металлических волноводов космических летательных аппаратов. Функционал приложения позволяет производить автоматизированное построение математической модели технологического процесса индукционной пайки с заданными параметрами, выполняя расчёты температурных значений деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки в зависимости от заданных типоразмеров, структурных-физических и термодинамических характеристик, мощности индуктора и положения фланца/муфты относительно индуктора. Полученный программный продукт является оптимальным решением для интеграции с системой, производящей управление технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов в качестве генератора математических моделей процесса индукционной пайки для обучения алгоритма. Проведены сравнительные исследования моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые строит математический модуль программы на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах. Эксперименты проводились на программно-аппаратном комплексе по управлению процессом индукционной пайки волноводных трактов, включающего генератор индукционного нагрева, индуктор, манипулятор-позиционер, промышленный компьютер IPPC-9171G-07BTO с консолью управления. Выполнена экспериментальная проверка корректности выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки и правильности её реализации в разработанном программном приложении. Рассчитаны значения среднеквадратичных отклонений результатов моделирования и реальных технологических процессов индукционной пайки волноводных трактов. В результате натурных и модельных экспериментов установлено, что реализованные приложением модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточной высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.*

*Волноводный тракт; индукционная пайка; моделирование процесса; разработка приложения; математическая модель; автоматизация процесса; верификация модели; автоматизированное управление.*

V.S. Marayev

### AUTOMATION OF MATHEMATICAL MODELING OF THE INDUCTION SOLDERING TECHNOLOGICAL PROCESS

*The paper has devoted to the research and automation of mathematical modeling of the process of heating the elements of the thin-walled aluminum waveguide path when working out the induction soldering technological procedure. The paper has reviewed the method of mathematical modeling of the induction soldering technological process. In order to develop the technological process of induction soldering, an instant source of a flat rod heating is used as a mathematical model of waveguide path heating. As part of this work, a functional automated subsystem of mathematical modeling of the induction soldering technological process of thin-walled metal waveguides of cosmic aircraft was designed and implemented. The functionality of the application allows you to make an automated construction of the mathematical model of the induction soldering technological process with specified parameters, performing calculations of the temperature values of the part-components participating in the process of the induction soldering, depending on the specified sizes, structural-physical and thermodynamic characteristics, the power of the inductor and the position of the flange/couplings relative to the inductor. The obtained software product is an optimal solution for integration with the system that produces the process of controlling the induction soldering of the waveguide paths of spacecraft as a generator of mathematical models of the induction soldering process for machine learning. Comparative researches of the induction soldering models have carried out, which builds the mathematical module of the program for their compliance with the real process in permissible limits. Experiments have conducted on a software system for controlling the induction soldering process of the waveguide paths, including an induction heating generator, an inductor, a manipulator, an IPPC-9171G-07BTO industrial computer with a control console. An experimental verification of the correctness of the selected mathematical model of the induction soldering technological process and the correctness of its implementation in the developed software application has performed. The MSE values of the results of modeling and real technological processes of induction soldering have calculated. As a result of attentive and model experiments, it has established that the application of the induction heating of the elements of thin-walled aluminum waveguide paths of cosmic aircraft with a sufficiently high accuracy simulates this technological process.*

*Waveguide path; induction soldering; process modeling; application development; mathematical model; process automation; model verification; automated control.*

Введение. Метод создания неразъемных соединений на основе индукционного нагрева широко используется при производстве тонкостенных алюминиевых волноводных трактов в аэрокосмической промышленности. Применение паяных тонкостенных волноводных трактов в составе конструкции космических аппаратов позволяет сократить межблочные расстояния между элементами полезной нагрузки, размещая ее при этом более компактно. Это, в свою очередь, позволяет снизить габариты и массу космических аппаратов на 15–20%, либо увеличить пропускную способность космических аппаратов при заданном ограничении по массе [1–3].

Однако применение таких высоко технологичных методов формирования неразъемных соединений усложняется наличием ряда внешних факторов, наибольшую сложность из которых представляют:

- 1) низкая степень повторяемости неавтоматизированного (ручного) процесса пайки/сварки;
- 2) сложность, а порой и невозможность визуального контроля нагрева деталей;
- 3) искажение электромагнитных полей оборудования, вследствие его взаимодействия с различными проводящими телами, находящимися вблизи зоны нагрева;
- 4) наложение помех на средства измерения, использующиеся при автоматизации процессов сварки/пайки, за счет действия мощных источников излучений вблизи процесса;

- 5) большие экономические потери при досрочном прекращении технологического процесса вследствие сбоя аппаратного или программного обеспечения;  
 б) влияние человеческого фактора [4–6].

Выше обозначенные проблемы управления современными процессами формирования неразъемных соединений могут быть решены в результате внедрения интеллектуальных технологий обработки информации и принятия решений в условиях неопределенности, что позволит проводить оценку достоверности получаемой из зоны нагрева информации, оценивать погрешности средств измерения и формировать адекватное управление технологическим процессом с целью повышения его точности и повторяемости [7–9].

Однако для внедрения подобных интеллектуальных методов необходимы высокоточные математические модели технологического процесса индукционной пайки. Таким образом, актуальной задачей является обзор, подбор и автоматизация разработки математических моделей для каждого элементов волноводного тракта.

В данной статье мы проведем обзор метода математического моделирования технологического процесса индукционной пайки, спроектируем и реализуем программное обеспечение для автоматизации моделирования процесса индукционной пайки и проведем сравнительное исследование построенных моделей на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах, таким образом проведем верификацию разработанного приложения и выбранных математических моделей, построенных с его применением.

Математическая модель технологического процесса индукционной пайки. В качестве математической модели нагрева волноводного тракта с целью отработки технологического процесса индукционной пайки используется мгновенный источник нагрева в плоском стержне (1):

$$T(x, t) = \int_0^t \frac{Q}{Fcp\sqrt{4\pi\alpha t}} e^{(-\frac{x^2}{4\alpha t} - bt)} + d. \quad (1)$$

$$b = \frac{\alpha p}{cpF}, \quad (2)$$

где  $Q$  – количество тепла [Дж],  $F$  – поперечное сечение трубы [ $\text{м}^2$ ],  $x$  – расстояние от источника тепла [м],  $cp$  – объемная теплоемкость [ $\text{Дж}/\text{м}^3$ ],  $t$  – время [сек],  $b$  – коэффициент тепловой конвекции во внешнюю среду с поверхности стержня (2),  $d$  – поправочный коэффициент (высчитывается эмпирически) [К],  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности [ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ],  $p$  – периметр сечения [м] [10].

В качестве примера элемента волноводного тракта возьмем тонкостенную алюминиевую трубу сборки волноводного тракта. Для моделирования процесса нагрева трубы сборки волноводного тракта следует исходить из соображений, что:

- 1) труба волноводного тракта представляет собой достаточно длинное тело из однородного материала,
- 2) труба волноводного тракта имеет относительно одинаковое поперечное сечение по всей длине,
- 3) труба волноводного тракта имеет схожий механизм теплопередачи и теплопроводности [11–15].

Из чего можно сделать вывод, что математическая модель плоского источника тепла в стержне справедлива для плоского источника тепла в прямоугольной трубе сборки волноводного тракта [16–18]. Таким образом мы вводим лишь геометрическое ограничение с одной стороны стержня, обозначая и учитывая ограниченность трубы со стороны вылета фланца при формировании соответствующего соединения [19–21]. Делая допущение о том, что волноводная труба равномерно нагревается по всему сечению, так как толщина стенок составляет 2 мм, а конст-

рукция индуктора такова, что вызывает равномерный нагрев по ее периметру. На рис. 1 показана типовая труба сборки волноводного тракта в реалистичном изображении.



Рис. 1. Концептуальное изображение трубы сборки волноводного тракта

Расчётная формула (3) для процесса нагрева волноводной трубы с привязкой к конкретному типоразмеру в таком случае представляет собой:

$$T(x, t) = \sum_{j=\{-1,1\}} \frac{Q}{Fcp\sqrt{4at}} \exp\left(-\frac{(x+jl)^2}{4at} - bt\right) + d. \quad (3)$$

Для экспериментального построения и последующей верификации примера модели технологического процесса индукционной пайки трубы сборки волноводного тракта возьмём конкретную трубу типоразмерами 22 x 11 мм. Её проекции изображены на рис. 2, где  $F$  – площадь сечения трубы,  $p$  – периметр сечения.

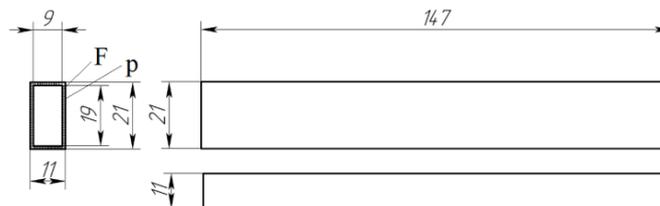


Рис. 2. Проекция трубы сборки волноводного тракта с типоразмерами

На рис. 3 представлен график модели нагрева трубы сборки волноводного тракта для разных значений мощности источника индукционного нагрева, где: синий график – температура трубы при мощности нагрева 11 кВт, оранжевый график – температура трубы при мощности нагрева 5 кВт, зеленый график – температура трубы при мощности нагрева 3 кВт.

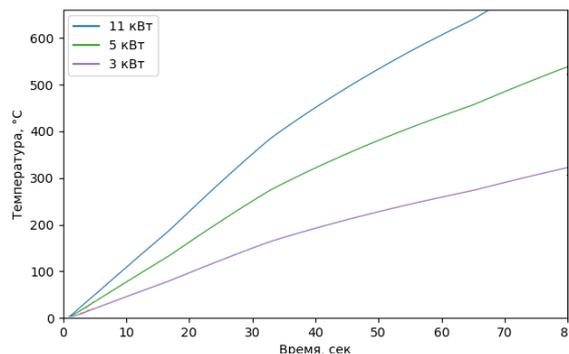


Рис. 3. График модели нагрева трубы сборки волноводного тракта

Следует автоматизировать моделирование технологического процесса индукционной пайки и провести верификацию выбранной математической модели нагрева волноводного тракта в процессе индукционной пайки на экспериментальных данных.

Автоматизация моделирования технологического процесса индукционной пайки. В качестве средства автоматизации моделирования технологического процесса индукционной пайки разработано настольное программное обеспечение на C++. В качестве основного фреймворка для разработки интерфейса выбран Qt 6.0.2. Qt – фреймворк для разработки кроссплатформенного программного обеспечения на языке программирования C++. Также, при разработке дополнительно использовались такие Qt библиотеки как QCustomPlot, QCore, QWidget, QtDataVisualization 1.15, QVector и т.д.

Архитектура программного продукта представлена на рис. 4 в виде краткой диаграммы классов. Изложим функции и задачи основных классов, а также их отношений.

- 1) MainWindow является одним из главных классов и реализует пользовательский интерфейс приложения, включая всю интерфейсную логику взаимодействия.
- 2) Класс Soldering выступает в роли контроллера построения математической модели технологического процесса индукционной пайки с заданными параметрами.
- 3) Класс MathModel выполняет построение математической модели технологического процесса индукционной пайки, выполняя расчёты температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки в зависимости от заданных типоразмеров, структурных-физических и термодинамических характеристик, мощности индуктора и положения фланца/муфты относительно индуктора.

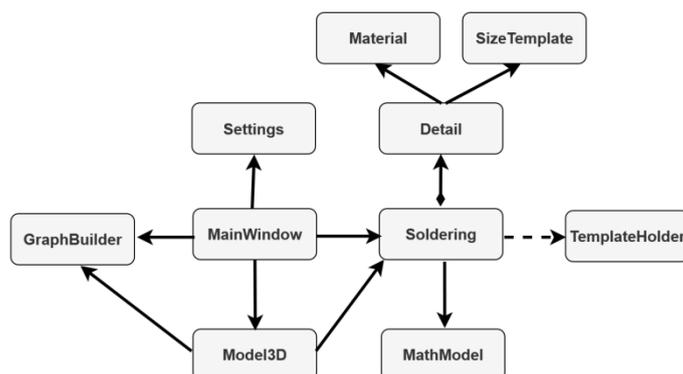


Рис. 4. Архитектура приложения

4) Класс Detail является абстракцией детали для пайки и содержит данные о компоненте сборки тракта, включая его тип (труба, фланец, муфта)

5) Класс Material реализует логику взаимодействия с физико-структурными и термодинамическими данными о материале компонента, включая его тип (алюминий, медь, сталь и др.), теплопроводность, объёмную теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи и др.

6) Класс SizeTemplate реализует логику взаимодействия с типоразмерами компонента, включая его длину, ширину, высоту, толщину стенок и др.

7) Класс GraphBuilder отвечает за построение 2d-графиков и реализует средства визуализации результата моделирования в виде графиков зависимости температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки от времени (продолжительности пайки) и точки измерения температуры.

8) Классы TemplateHolder является вспомогательным и хранит в себе данные макросов для быстрого ввода данных типоразмеров, характеристик материала, технологических параметров пайки и параметров моделирования.

9) Класс Settings реализует наличие гибких настроек приложения.

10) Класс Model3D отвечает за построение 3d-модели компонента в процессе индукционной пайки с визуальным цветовым отображением температурных характеристик.

Запуск программы происходит путем открытия исполняемого файла SolderingMathModel.exe. При запуске программы открывается главное окно приложения, изображенное на рис. 5. В данном окне пользователю предоставлен ряд возможностей:

1) вводить данные о компоненте сборки тракта, включая его тип (труба, фланец, муфта), его типоразмеры (длина, ширина, высота, толщина стенок и др.) (рис. 5, левый-верхний блок), его материал (алюминий, медь, сталь и др.) и термодинамические характеристики материала (теплопроводность, объёмная теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи и др.) (рис. 5, правый верхний блок);

2) вводить технологические параметры пайки, включая мощность индуктора (мощность нагрева), расстояние от торца индуктора до точки нагрева, смещение индуктора относительно центра трубы, смещение пирометра относительно центра трубы, а также, параметры моделирования, включая начальную и конечную температуры и временной шаг модуляции (рис. 5, центральный блок);

3) запускать построение математической модели технологического процесса индукционной пайки с заданными параметрами, выполняя расчёты температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки в зависимости от заданных типоразмеров, структурных-физических и термодинамических характеристик, мощности индуктора и положения фланца/муфты относительно индуктора (рис. 5, кнопки справа по центру);

4) просматривать результат моделирования в виде графиков зависимости температурных параметров деталей-компонентов участвующих в процессе индукционной пайки от времени (продолжительности пайки) и точки измерения температуры (рис. 5, графики в нижней части окна);

5) запускать моделирование процесса индукционной пайки в реальном времени с возможностью изменения технологических параметров модели в реальном времени (рис. 5, кнопки справа по центру);

б) и другие функции, которые можно обнаружить на рис. 5.

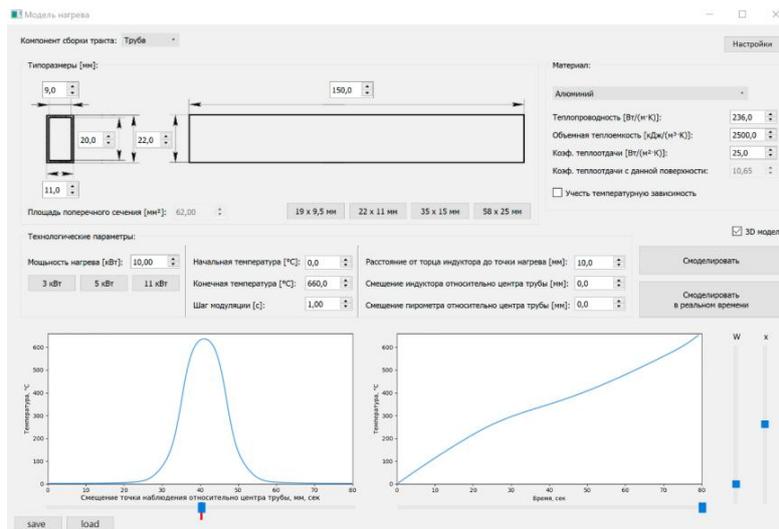


Рис. 5. Главный пользовательский интерфейс приложения

Разработанное программное средство имеет 4 внешних интерфейса для разных целей:

1) первый интерфейс представляет настольное приложение для математического и графического моделирования технологического процесса индукционной пайки и используется скорее в верификационных и научных целях, чем практических;

2) второй интерфейс предназначен для взаимодействия с глобальной системой автоматизированного управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов. Для неё приложение служит дополняющим модулем обучения с использованием построения математической модели технологического процесса индукционной пайки;

3) третий интерфейс служит линией экспорта и импорта данных через файловую систему в виде файлов .sld, содержащих данные о математической и графической модели технологического процесса индукционной пайки;

4) четвёртый интерфейс реализован в классе OutInterface.cpp и может использоваться для доступа к инструментам математического и графического моделирования технологического процесса индукционной пайки из других сторонних систем/приложений.

Последующее применение разработанного приложения заключается в интеграции с глобальной системой автоматизации технологического процесса индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов.

Верификация математической модели технологического процесса индукционной пайки и разработанного программного приложения. Проверим корректность выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки и правильность её реализации в разработанном программном приложении. Для этого проведём сравнительное исследование моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые строит математический модуль программы на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах.

Эксперименты проводились на программно-аппаратном комплексе по управлению процессом индукционной пайки волноводных трактов. Структурно установка состоит из следующих компонентов (рис. 6): генератор индукционного нагрева (1), устройство согласования (2), набор индукторов с рабочими окнами (3), манипулятор-позиционер (4), индуктор (5), консоль управления (6), амперметр (7).

В качестве компьютера используется промышленный компьютер IPPC-9171G-07ВТО, имеющий компактное исполнение, защищенное от помех, позволяющее использовать для соединения с внешними устройствами ввода/вывода информации интерфейсную плату PCI-1710 и дополнительные разъемы RS-232. Наличие сенсорного экрана делает работу для оператора более удобной и наглядной. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.

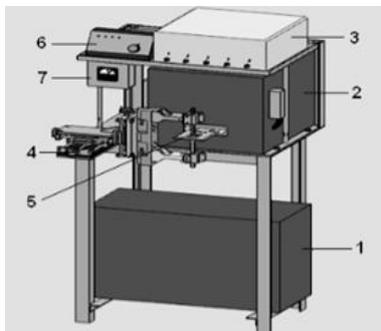


Рис. 6. Установка индукционной пайки

В качестве примера для опыта по сопоставлению результатов экспериментальных исследований и моделирования используем ту же тонкостенную алюминиевую трубу сборки волноводного тракта 22 x 11 мм (рис. 2). На рис. 7 представлены сводные данные для сравнения модельных графиков и графиков реального технологического процесса индукционного нагрева элемента сборки волноводного тракта при разных значениях мощности источника индукционного нагрева. Где синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 11 кВт; оранжевый график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 11 кВт; зеленый график – график волноводной (модель), мощность 5 кВт; красный график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 5 кВт; синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 3 кВт; коричневый график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 3 кВт. Реальные экспериментальные данные об изменении температуры доступны только начиная от 200 °С поскольку имеющиеся пирометры имеют диапазон измеряемых температур 200-1800 градусов. Однако имеющихся данных вполне хватит чтобы корректно оценить качество моделирования технологического процесса индукционной пайки.

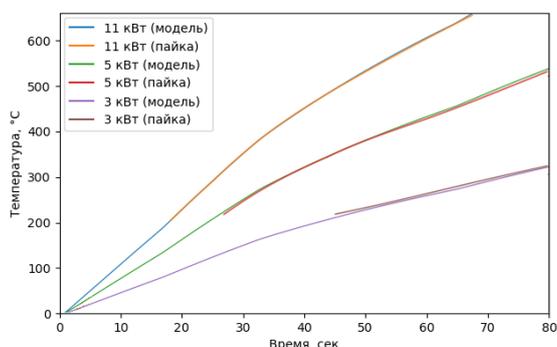


Рис. 7. Сравнительный график модели и реального технологического процесса индукционного нагрева элемента сборки волноводного тракта

В табл. 1 приведены значения среднеквадратичных отклонений результатов моделирования и реальных технологических процессов индукционной пайки волноводных трактов.

Таблица 1

**Среднеквадратичные отклонения результатов моделирования для разных параметров индукционной пайки**

Мощность источника нагрева, $P$	Среднеквадратичное отклонение
3 кВт	2,3 °С
5 кВт	2,1 °С
11 кВт	1,9 °С

Как видно из представленных выше графиков, а также данных об относительно низком значении среднеквадратичной ошибки, представленных в табл. 1, реализованные приложением модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточно высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Результаты натуральных и модельных экспериментов показывают, что разработанный программный продукт, реализующий предложенные математические модели технологического процесса индукционной пайки, можно использовать для отработки разных режимов работы технологического процесса индукционной пайки тонкостенных волноводных трактов космических летательных аппаратов.

**Заключение.** В рамках данной работы была спроектирована и реализована функциональная автоматизированная подсистема математического моделирования технологического процесса индукционной пайки тонкостенных металлических волноводов космических летательных аппаратов. Полученный программный продукт является оптимальным решением для интеграции с системой, производящей управление технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов в качестве генератора математических моделей процесса индукционной пайки для обучения алгоритма.

Проведены сравнительные исследования моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые строит математический модуль программы на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах.

Выполнена экспериментальная проверка корректности выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки и правильности её реализации в разработанном программном приложении.

В результате натуральных и модельных экспериментов установлено, что реализованные приложением модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминийевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточной высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Целью дальнейших исследований может являться повышение точности автоматизированного моделирования технологического процесса индукционной пайки волноводных трактов путём внедрения интеллектуальных методов анализа данных и построения моделей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Emilova O.A., Bocharov A.N., Laptanok V.D.* The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 155, No. 1. – P. 012007.
2. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Petrenko V.E., Seregin Y.N., Emilova O.A.* A control algorithm for waveguide path induction soldering with product positioning // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 255, No. 1. – P. 012018.
3. *Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptanok V.D., Emilova O.A., Bocharov A.N.* Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 173, No. 1. – P. 012023.
4. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V.* Neural Network Modeling to Control Process of Induction Soldering // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2019. – P. 1-5.
5. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Petrenko V.E.* Algorithmic and software to identify errors in measuring equipment during the formation of permanent joints // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – P. 1-5.
6. *Milov A.V. et al.* Use of artificial neural networks to correct non-standard errors of measuring instruments when creating integral joints // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1118, No. 1. – P. 012037.
7. *Bukhtoyarov V.V. et al.* Intelligently informed control over the process variables of oil and gas equipment maintenance // International Review of Automatic Control. – 2019. – Vol. 12, No. 2. – P. 59-66.
8. *Bocharova O.A. et al.* Induction heating simulation of the waveguide assembly elements // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1353, No. 1. – P. 012040.

9. *Murygin A.V. et al.* Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering // IOP Conference Series: Materials science and engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 173, No. 1. – P. 012026.
10. *Milov A., Tynchenko V., Petrenko V.* Intellectual Control of Induction Soldering Process using Neuro-fuzzy Controller // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). –2019. – P. 1-6.
11. *Zhu T. et al.* The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model // 2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering. – 2013. – P. 123-127.
12. *Pánek D. et al.* Reduced-order model based temperature control of induction brazing process // 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM). – 2019. – P. 1-4.
13. *Eftychiou M.A., Bergman T.L., Masada G.Y.* A detailed thermal model of the infrared reflow soldering process. – 1993.
14. *Щерба А.А. и др.* Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков // Технічна електродинаміка. – 2013.
15. *Клочкова Н.Н. и др.* Моделирование индукционной установки специального назначения средствами программного пакета Flux // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 2, №. 1 (79).
16. *Вдовин К.Н., Егорова Л.Г., Гуков М.В.* Программное обеспечение для математического моделирования индукционного нагрева и закалки цилиндрических деталей // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – №. 2. – С. 40-45.
17. *Долгих И.Ю., Королев А.Н., Захаров В.М.* Математическое моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве // Электротехника. Энергетика. Машиностроение. – 2014. – С. 85-88.
18. *Шарапова О.Ю.* Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – №. 7.
19. *Черных И.В.* Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева // Научно-практический журнал Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – №. 2.
20. *Zeller U. et al.* Multiphysics simulation of induction soldering process // 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). – 2018. – P. 654-659.
21. *Papargyri L. et al.* Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review // Renewable Energy. – 2020. –Vol. 145. – P. 2387-2408.

#### REFERENCES

1. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Emilova O.A., Bocharov A.N., Laptinok V.D.* The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, Vol. 155, No. 1, pp. 012007.
2. *Tynchenko V.S., Murygin A.V., Petrenko V.E., Seregin Y.N., Emilova O.A.* A control algorithm for waveguide path induction soldering with product positioning, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 255, No. 1, pp. 012018.
3. *Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptinok V.D., Emilova O.A., Bocharov A.N.* Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 173, No. 1, pp. 012023.
4. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V.* Neural Network Modeling to Control Process of Induction Soldering, *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2019, pp. 1-5.
5. *Milov A.V., Tynchenko V.S., Petrenko V.E.* Algorithmic and software to identify errors in measuring equipment during the formation of permanent joints, *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2018, pp. 1-5.
6. *Milov A.V. et al.* Use of artificial neural networks to correct non-standard errors of measuring instruments when creating integral joints, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1118, No. 1, pp. 012037.

7. Bukhtoyarov V.V. et al. Intelligently informed control over the process variables of oil and gas equipment maintenance, *International Review of Automatic Control*, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 59-66.
8. Bocharova O.A. et al. Induction heating simulation of the waveguide assembly elements, *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, Vol. 1353, No. 1, pp. 012040.
9. Murygin A.V. et al. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering, *IOP Conference Series: Materials science and engineering*. IOP Publishing, 2017, Vol. 173, No. 1, pp. 012026.
10. Milov A., Tynchenko V., Petrenko V. Intellectual Control of Induction Soldering Process using Neuro-fuzzy Controller, *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2019, pp. 1-6.
11. Zhu T. et al. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model, *2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering*, 2013, pp. 123-127.
12. Pánek D. et al. Reduced-order model based temperature control of induction brazing process, *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)*, 2019, pp. 1-4.
13. Eftychiou M.A., Bergman T.L., Masada G.Y. A detailed thermal model of the infrared reflow soldering process, 1993.
14. Shcherba A.A. i dr. Komp'yuternoe modelirovanie elektroteplovyykh protsessov i termomekhanicheskikh napryazheniy pri induktsionnom nagreve dvizhushchikhsya mednykh slitkov [Computer modeling of electro-heat processes and thermomechanical stresses during induction heating of moving copper ingots], *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2013.
15. Klochkova N.N. i dr. Modelirovanie induktsionnoy ustanovki spetsial'nogo naznacheniya sredstvami programmnoho paketa Flux [Modeling of the induction installation of special purpose by means of the FLUX software package], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2015, Vol. 2, No. 1 (79).
16. Vdovin K.N., Egorova L.G., Gukov M.V. Programmnoe obespechenie dlya matematicheskogo modelirovaniya induktsionnogo nagreva i zakalki tsilindricheskikh detaley [Software for mathematical modeling of induction heating and hardening cylindrical parts], *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2012, No. 2, pp. 40-45.
17. Dolgikh I.Yu., Korolev A.N., Zakharov V.M. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh i teplovyykh protsessov pri induktsionnom nagreve [Mathematical modeling of electromagnetic and thermal processes in induction heating], *Elektrotehnika. Energetika. Mashinostroenie* [Electrical engineering. Energy. Mechanical engineering], 2014, pp. 85-88.
18. Sharapova O.Yu. CHislennoe modelirovanie protsessa periodicheskogo induktsionnogo nagreva na baze konechno-elementnogo programmnoho paketa FLUX [Numerical modeling of a periodic induction heating process based on the finite elemental software package FLUX], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences], 2010, No. 7.
19. Chernykh I.V. Paket ELCUT: modelirovanie ustroystv induktsionnogo nagreva [ELCUT package: modeling of induction heating devices], *Nauchno-prakticheskiy zhurnal Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh* [Scientific and practical magazine Exponenta Pro. Mathematics in applications], 2003, No. 2.
20. Zeller U. et al. Multiphysics simulation of induction soldering process, *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, 2018, pp. 654-659.
21. Papargyri L. et al. Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review, *Renewable Energy*, 2020, Vol. 145, pp. 2387-2408.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.С. Тынченко.

**Мараев Вячеслав Сергеевич** – Сибирский федеральный университет; e-mail: slava9517538426@gmail.com; г. Красноярск, Россия; кафедра информатики; магистрант.

**Marayev Vyacheslav Sergeevich** – Siberian Federal University; e-mail: slava9517538426@gmail.com; Krasnoyarsk, Russia; the department of informatics; graduate student.