

Милов Антон Владимирович

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ НА ОСНОВЕ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Тынченко Вадим Сергеевич

Официальные оппоненты: **Кравец Олег Яковлевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»,
профессор кафедры автоматизированных
и вычислительных систем

Сташков Дмитрий Викторович
кандидат технических наук,
АО «СИНЕТИК»,
ведущий специалист по АСУ ТП горнорудной
промышленности

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»

Защита состоится «14» октября 2022 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.01 при Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева по адресу: 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Кандидат технических наук, доцент

Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Технология индукционной пайки (ИП) широко используется для создания неразъемных соединений при производстве различной продукции, в частности, при производстве волноводных трактов космических аппаратов. Управление технологическим процессом (ТП) ИП происходит в условиях неопределенности, вызванных либо полным отсутствием информации о температуре нагрева элементов сборки изделия, либо недостаточной достоверностью данной информации, что делает контроль нагрева невозможным. Недостоверность информации о температуре нагрева элементов сборки, как правило, вызвана наличием погрешностей бесконтактных средств измерения, широко применяемых на практике. Применение интеллектуальных методов обработки информации (ИМОИ) позволит проводить оценку достоверности информации, получаемой из зоны нагрева, оценивать погрешности средств измерения и формировать адекватное управление ТП в условиях неопределенности с целью повышения качества управления процессом пайки. Таким образом, можно утверждать, что разработка технологии управления ИП на основе ИМОИ является **актуальной научно-технической задачей**.

Степень разработанности темы. Вологдин В. П. и Лозинский М. Г. заложили основы применения индукционного нагрева в отечественном машиностроении в первой половине XX века. Многие российские предприятия занимались решением задач, связанных с технологией индукционного нагрева, а также с ее конкретными реализациями. К таким предприятиям можно отнести: ВНИИТВЧ-ЭСТЭЛ (г. С.-Петербург), ФГУП «НКТБ «Вихрь», НПП «Курай», НПО «Параллель» (г. Уфа), АО «ЦКБ «Геофизика» (г. Красноярск), ООО «ЭКОМ» (г. Красноярск). НПП «ЭЛТЕРМ-С» разработало ряд установок индукционного нагрева различного целевого назначения, среди которых: установка ЭЛТЕРМ-С УИНТ-50-2,4 для термической обработки сварных швов, предварительного нагрева элементов сборки, термической обработки прямолинейных сварных швов; установка ЭКУ-2П для автоматизированной пайки и термической обработки. На предприятии ОАО «ЦКБ «Геофизика»» был разработан комплекс индукционный технологический КИТ-25, предназначенный для широкого круга технологических операций, связанных с индукционным нагревом, в том числе для ИП. Известно устройство, представленное в работе Голубя Б. И. и Комиссарчика В. М., которое останавливает процесс нагрева изделия при достижении температуры плавления припоя. Однако, такой подход к управлению не всегда обеспечивает стабильное качество изделия. Потанин А. С. и Барменкова Б. Г. предлагают пропорционально разнице температур участком заготовки изменять мощность нагрева. Предложенный способ пайки обладает низкой точностью измерений, что негативно сказывается на качестве управления и выпускаемых изделий. В работе Хацаюка М. Ю. представлены установка индукционного нагрева для приготовления и разлива алюминиевых сплавов.

Следует отметить, что у большинства существующих разработок имеется общий недостаток – отсутствие, либо высокая сложность контроля температуры нагрева. Отсутствие контроля температуры говорит о невозможности контроля расплавления припоя и протекания его между соединяемыми элементами изделия.

Известны работы по моделированию индукционных процессов. Задачей моделирования индукционного нагрева занимались такие ученые, как: Рапопорт Э. Я., и Плешивцева Ю. Э., Rhein S., Utz T., Graichen K., Furrer D. U., Semiatin S. L., Wang K. F., Chandrasekar S., Yang H. T. Y., Ruffini R. S., Fomin A., Nemkov V. S., Goldstein R. C., Шарапова О. Ю., Карпушкин С. В., Карпов С. В., Глебов А. О., Немков В. С., Хацаюк М. Ю. В то же время, несмотря на имеющиеся научно-технические решения, вопрос использования интеллектуальных методов для управления ТП ИП проработан недостаточно. В частности, существует ряд работ, в которых представлен продукционный метод описания, анализа и синтеза автоматических регуляторов на примере управления ТП ИП, однако данный подход не позволяет производить управление ТП ИП в условиях неполной или отсутствующей информации о температуре нагрева изделия.

Объектом исследования диссертации является технологический процесс индукционной пайки. **Предметом исследования** является применение интеллектуальных методов обработки информации для управления технологическим процессом индукционной пайки.

Цель диссертационной работы состоит в повышении качества управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов посредством внедрения технологии управления на основе интеллектуальных методов обработки информации.

Сформулированная цель предопределила следующую совокупность решаемых **задач**:

1. Анализ методов и средств управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов, а также методов его моделирования.
2. Разработка технологии интеллектуального управления процессом индукционной пайки волноводных трактов, позволяющей: повысить достоверность информации о технологическом процессе, повысить повторяемость технологического процесса, повысить стабильность работы системы управления.
3. Практическая реализация интеллектуального подхода к управлению процессом индукционной пайки волноводных трактов.
4. Проверка работоспособности программного обеспечения.

Методы исследования. Для решения задач научного исследования используются подходы, разработанные в рамках теории и практики системного анализа, машинного обучения, теорий оптимизации и автоматического управления, а также методика создания прикладных интеллектуальных систем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый метод определения и коррекции погрешностей дистанционных средств измерения температуры в процессе индукционной пайки, отличающийся от известных использованием искусственных нейронных сетей, позволяющий повысить качество управления процессом индукционной пайки посредством снижения влияния погрешностей измерения пирометрических датчиков.
2. Разработан новый метод управления индукционной пайкой, основанный на моделировании показаний пирометрических датчиков средствами искусственных нейронных сетей, позволяющий повысить живучесть автоматизированной системы управления и успешно довести до конца процесс индукционной пайки с требуемым качеством в условиях неполной или недостоверной информации о температуре паяемых соединений.
3. Разработан новый алгоритм управления индукционной пайкой, основанный на использовании искусственных нейронных сетей, позволяющий успешно довести до конца управление индукционной пайкой с требуемым качеством в условиях потери информации с пирометрических датчиков.

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании и развитии подхода к управлению технологическим процессом индукционной пайки с помощью интеллектуальных методов обработки информации.

Практическая значимость. Разработана программная система, реализующая управление технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов на основе интеллектуальных методов обработки информации. Работа выполнена в рамках Гранта Президента Российской Федерации № МК-6356.2018.8 от 17.01.2018 по теме «Интеллектуализация технологических процессов формирования неразъемных соединений на предприятиях ракетно-космической отрасли», а также в рамках внутреннего гранта СибГУ им. М.Ф. Решетнева на выполнение НИР по перспективным научным направлениям среди аспирантов и молодых ученых №02 (приказ по СибГУ им. М.Ф. Решетнева от 06.04.2020 г. № 681) по теме «Математическое и программное обеспечение процесса индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов». Разработанная система может использоваться на предприятиях ракетно-космической отрасли, таких как АО «Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнева», АО «Красноярский

машиностроительные завод», АО «НПП Радиосвязь». Получен акт о внедрении научных и практических результатов на АО «Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнева».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый метод определения и коррекции погрешностей дистанционных средств измерения температуры в процессе индукционной пайки позволяет повысить качество управления технологическим процессом пайки посредством снижения влияния погрешностей измерений пирометрических датчиков.

2. Новый метод управления индукционной пайкой позволяет завершить индукционную пайку волноводных трактов космических аппаратов с требуемым качеством в условиях неполной или недостоверной информации о температуре паяемых соединений.

3. Новый интеллектуальный алгоритм управления индукционной пайкой позволяет успешно довести до конца управление индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов с требуемым качеством в условиях потери информации с пирометрических датчиков.

4. Разработанная программная система позволяет повысить качество управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов в условиях неполной, либо недостоверной информации с пирометрических датчиков о температуре спаиваемых элементов изделия.

Апробация работы. Процесс разработки и результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня: международных научных конференциях ITBI-2018 (г. Томск, 2018), FarEastCon-2018 (г. Владивосток, 2018), SGEM-2018 (г. София, Болгария, 2018), ICIE-2019 (г. Сочи, 2019), RusAutoCon-2019 (г. Сочи, 2019), ApiTech-2019 (г. Красноярск, 2019), CoMeSySo-2020 (г. Злин, Чехия, 2020), CSOC-2020 (г. Злин, Чехия, 2020), «MIP: Engineering-2020 (г. Красноярск, 2020), IEEE MetroInd4.0&IoT 2021 (г. Рим, Италия, 2021); международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2016, 2018, 2019).

Публикации. По теме данной работы опубликовано 28 печатных работ, среди которых 11 статей в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, а также 17 работ в изданиях из международных систем цитирования Web of Science и/или Scopus. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 192 наименований и приложений. Текст работы изложен на 134 страницах, включая 61 рисунок и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и практической ценности проведенных исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава работы посвящена анализу методов и средств управления индукционной пайкой. В данной главе рассматриваются: методы производства волноводных трактов космических аппаратов (ВТКА), автоматизированные системы управления ИП, описывается экспериментальная установка для проведения исследований технологических процессов, а также приводится описание методов моделирования процесса ИП.

Система ВТКА (рисунок 1) необходима для передачи высокочастотных сигналов радиодиапазона от антенн до радиопередатчика или приемника с целью обеспечения функционирования космического аппарата и его бортовых систем в соответствии с заданной программой без потерь на затухание. При изготовлении ВТКА предъявляют особые требования к чистоте внутренней поверхности и герметичности. Соединять элементы сборки ВТКА можно с использованием аргонодуговой сварки, электронно-лучевой сварки, пайки в солевой ванне, индукционной пайки. К основным преимуществам ИП относятся: меньшая

деформация изделий вследствие зонального нагрева; высокая скорость нагрева; высокая производительность процесса, обусловленная концентрацией мощности в малом объеме; простота автоматизации; дешевизна ТП; меньшее количество вредных производственных факторов.



Рисунок 1 –Примеры волноводных трактов разных конфигураций

Объектом исследования в рамках данной работы выступает технологический процесс индукционной пайки волноводных трактов, представленный на рисунке 2.

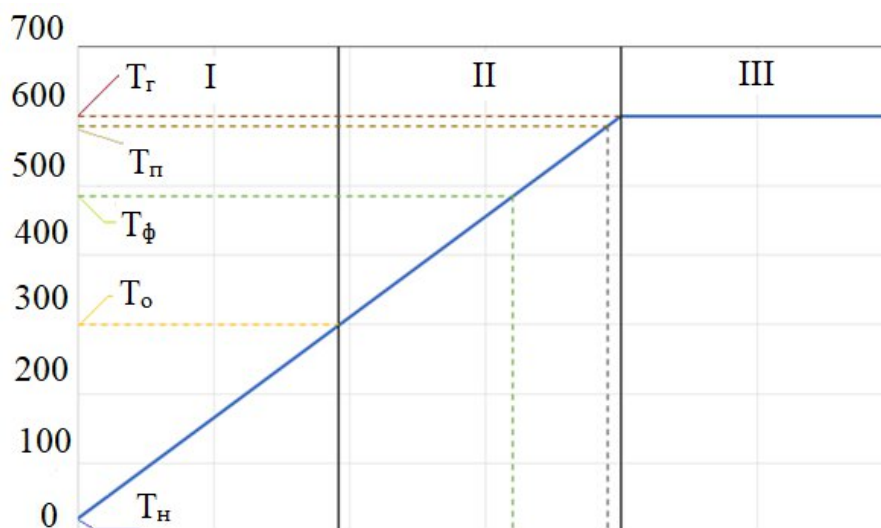


Рисунок 2 – Общий вид процесса индукционной пайки, где: T_n – начальная температура нагрева заготовки, T_o – температура начала этапа основного нагрева, T_ϕ – температура плавления флюса, T_n – температура плавления припоя, T_r – температура формирования галтели, I – этап предварительного нагрева изделия, II – этап основного нагрева изделия, III – этап стабилизации

В рамках такого технологического процесса производится соединение труб волноводного тракта с фланцем/муфтой. Для создания надежного соединения на спаиваемые детали наносится флюс. Флюс необходим для снятия и предотвращения возникновения оксидных пленок на спаиваемых деталях, а также для лучшей смачиваемости основного материала припоем. При использовании флюса припой лучше протекает во все зазоры спаиваемого соединения, что положительным образом сказывается на прочности соединения.

Управление ТП ИП сопряжено с некоторыми сложностями. В частности, на этапе основного нагрева (этап II на рисунке 2) возможны такие явления, как расплавление и испарение флюса, а в конце этапа происходит расплавление и протекание припоя. Вследствие

этих явлений происходит резкое перераспределение тепловой энергии, что может вызвать перерегулирование на этапе стабилизации (этап III на рисунке 2). Особенно данная проблема актуальна при недостаточно качественной подготовке поверхности заготовок, недостаточном или чрезмерном количестве флюса, окислении поверхности заготовок.

Для отработки технологии управления ИП ВТКА была использована установка (рисунок 3), включающая в себя следующие составные части: генератор индукционного нагрева, устройство согласования, набор индукторов, пирометрические датчики измерения температуры, электромеханический привод.

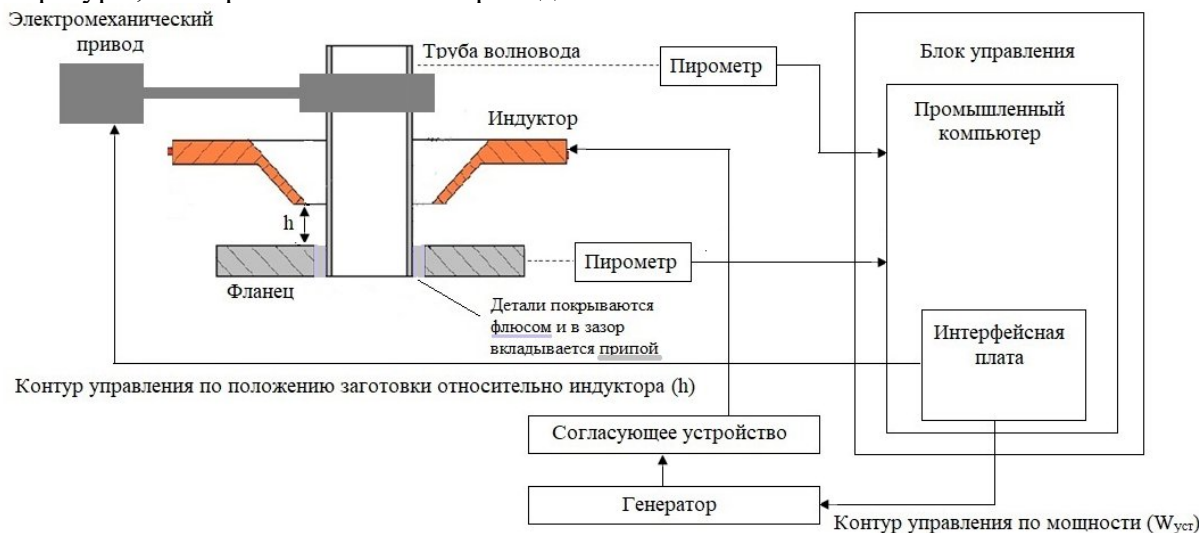


Рисунок 3 – Структурная схема установки

В основе экспериментальной установки находится промышленный компьютер IPPC-9171G, выполненный в виде компактной помехозащищенной конструкции с интерфейсной платой PCI-1710 для соединения с внешними устройствами. Для измерения температуры нагрева элементов сборки ВТКА используются пирометры AST 250.

На рисунке 4 представлена структурная схема процесса управления ИП волноводных трактов. Для сбора оперативной информации о ТП используются бесконтактные датчики измерения температуры – пирометры.

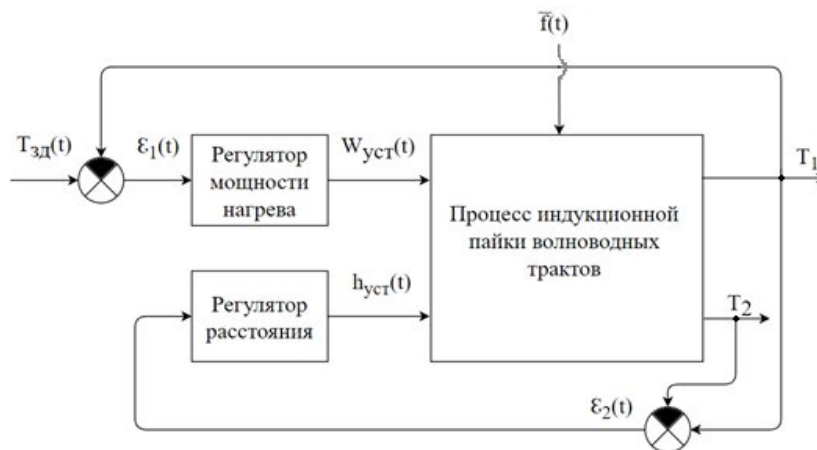


Рисунок 4 – Структурная схема процесса управления ИП волноводных трактов, где: $T_{зд}(t)$ – программа нагрева изделия (значения требуемой температуры процесса в каждый момент времени); $\varepsilon_1(t)$ – расхождение температуры фланца/муфты изделия с программой нагрева; $\varepsilon_2(t)$ – расхождение температур спаиваемых элементов; $W_{уст}(t)$ – уставка мощности, подаваемая на индукционный генератор для управления интенсивностью нагрева; $h_{уст}(t)$ – уставка расстояния от фланца/муфты до окна индуктора, подаваемая на сервопривод для изменения распределения магнитного поля между элементами спаиваемого изделия; T_1 – температура нагрева фланца/муфты; T_2 – температура нагрева волноводной трубы; $f(t)$ – вектор возмущающих воздействий, оказывающих влияние на течение процесса ИП

К возмущающим воздействиям относятся:

1. Изменение излучательной способности материала спаиваемых элементов сборки ВТКА на этапе основного нагрева (этап II на рисунке 2).

2. Погрешности в размерах компонентов волноводных трактов в рамках технологических допусков при их изготовлении, что усложняет обеспечение минимальной разницы температур нагрева спаиваемых элементов сборки.

3. Человеческий фактор – ошибки технолога и оператора при первоначальной настройке параметров процесса ИП и при подготовке поверхности спаиваемых элементов.

Вследствие особенностей высокотемпературных пирометрических датчиков диапазон их измерений начинается с 300 °С. Технологическим процессом не предусмотрен обязательный контроль нагрева изделия на этапе предварительного нагрева (этап I на рисунке 2), однако контроль нагрева изделия на данном этапе может позволить снизить разницу нагрева элементов сборки к началу этапа основного нагрева (этап II на рисунке 2).

Кроме того, в случае отказа хотя бы одного из пирометров в процессе пайки корректное завершение ТП становится невозможным. Устойчивость системы управления обеспечивается снятием условий неопределенности, вызванных возмущающими воздействиями, посредством использования ИМОИ.

В рамках данной работы в качестве альтернатив при выборе интеллектуального метода рассматривались методы на основе деревьев решений, нечеткой логики и искусственных нейронных сетей (ИНС).

С целью определения наиболее эффективного интеллектуального метода для решения поставленных в работе задач проведено экспериментальное сравнение их эффективности. В качестве тестовой задачи, на которой будет проверяться эффективность решения разными методами, выбрана задача определения погрешностей средств измерения. Проверка эффективности предложенных методов производилась с помощью варьирования параметров алгоритмов и k-fold кросс-валидации с $k = 10$, т. е. обучающая выборка разделялась на 10 частей, на каждой из которых происходила проверка каждого метода. В таблице 1 сведены усредненные результаты сравнительного анализа интеллектуальных методов.

Таблица 1 – Таблица сравнения интеллектуальных методов.

Метод	Точность распознавания, %
Метод на основе решающих деревьев	85,5%
Метод на основе нечеткой логики	88,6%
Метод на основе ИНС	91,7%

Как видно из таблицы 1, все рассматриваемые методы обеспечивают достаточно высокую точность решения задачи. Однако, ИНС показали более высокую точность, что говорит об обоснованности их выбора для решения поставленной задачи.

Во **второй главе** разработаны метод и алгоритм управления ИП ВТКА. Разработанные метод и алгоритм предназначены для повышения качества управления процессом ИП ВТКА на основе ИМОИ, в частности ИНС. Принцип разработанного подхода заключается в функционировании на протяжении всего процесса пайки предварительно обученных ИНС. Структуры ИНС получены с использованием многокритериального генетического алгоритма FFGA (Fonseca and Fleming's Multiobjective Genetic Algorithm).

Формальная постановка задачи определения наилучшей структуры ИНС выглядит следующим образом (1):

$$\begin{cases} Err(M_c, M_w, \overline{act}) \rightarrow \min \\ Cmp(M_c, \overline{act}) \rightarrow \min \end{cases} \quad (1)$$

где: Err – общая среднеквадратичная ошибка обучения искусственной нейронной сети; Cmp – вычислительная сложность нейросетевой модели, выражающаяся в операциях с

плавающей точкой в секунду; M_c – матрица связей искусственной нейронной сети; M_w – матрица весов связей искусственной нейронной сети; $\overline{act}$ – вектор активационных функций нейронов в искусственной нейронной сети.

ИНС_{идент} предназначена для определения и классификации погрешностей на основе информации, поступающей со средств измерения. Данная ИНС представляет собой классическую сеть прямого распространения. На вход данной ИНС подается временной ряд измерений температуры нагрева одного из элементов сборки, а на выходе имеются два класса: *pr* – наличие погрешности, *corr* – признак того, требуется ли коррекция погрешности. ИНС_{корр} предназначена для коррекции выявленных погрешностей средств измерения в процессе ИП ВТКА. ИНС_{корр} также представляет собой сеть прямого распространения. Входные факторы аналогичны ИНС, рассмотренной ранее, а на выходе прогнозируется скорректированное значения температуры.

ИНС_{прогноз} предназначена для прогнозирования измерения отказавшего пирометра в процессе ИП ВТКА при работоспособности второго пирометра (рисунок 5). ИНС_{упр} предназначена для управления ТП ИП ВТКА при отсутствии оперативной информации о температуре нагрева элементов сборки (рисунок 6).

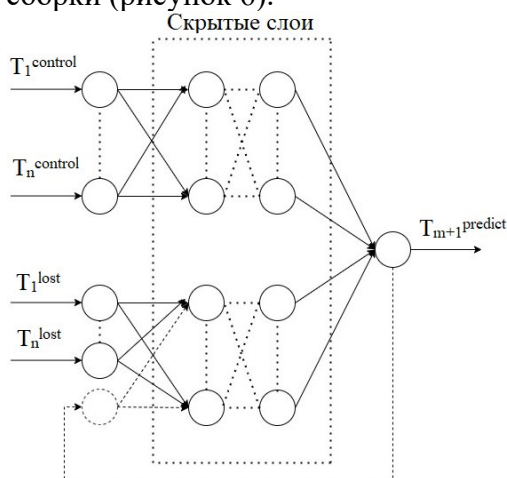


Рисунок 5 – Общая структура ИНС прогнозирования измерений, где: $T_1^{control}, \dots, T_m^{control}$ – временной ряд данных с функционирующего пирометра; $T_1^{lost}, \dots, T_m^{lost}$ – временной ряд данных с отказавшего пирометра; $T_{m+1}^{predict}$ – спрогнозированное измерение.

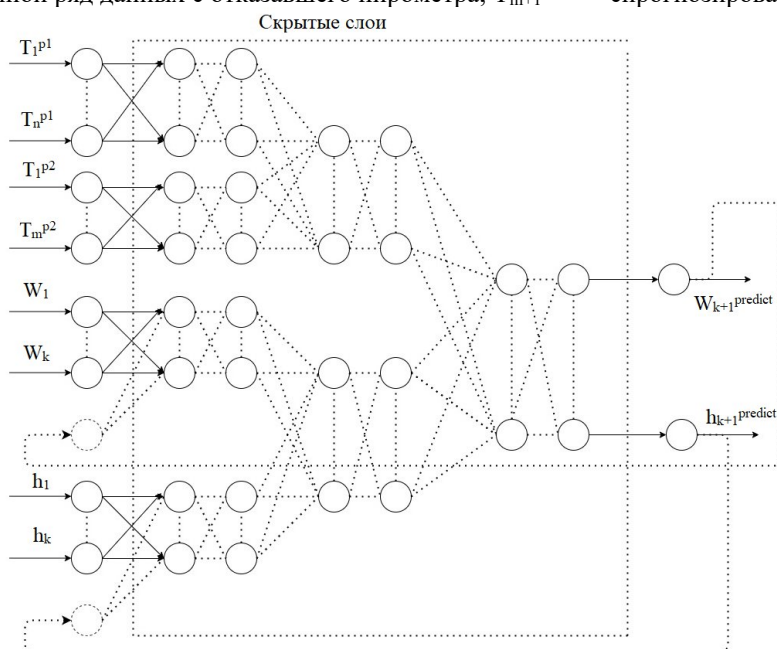


Рисунок 6 – Общая структура ИНС управления, где: $T_1^{p1}, \dots, T_n^{p1}, T_1^{p2}, \dots, T_m^{p2}$ – временные ряды измерений пирометров; $h_1, \dots, h_k$ – временной ряд значений расстояния от индуктора до сборки волноводного тракта; $W_1, \dots, W_k$ – временной ряд значений уставок мощности; $h_{k+1}^{predict}$ – вычисленное значение расстояния от индуктора до заготовки; $W_{k+1}^{predict}$ – вычисленное значение уставки мощности индуктора.

ИНС_{упр} также представляет из себя рекуррентную ИНС, т. е. содержит в себе обратные связи по спрогнозированным значениям уставки мощности и расстояния от заготовки до окна индуктора. Совместное использование представленных выше ИНС позволит как снизить влияние погрешностей измерений пирометрических датчиков, так и производить ИП ВТКА с требуемым качеством в условиях неполной информации либо в условиях отсутствия информации с пирометрических датчиков.

Типовой сценарий работы предлагаемой технологии представлен на рисунке 7.

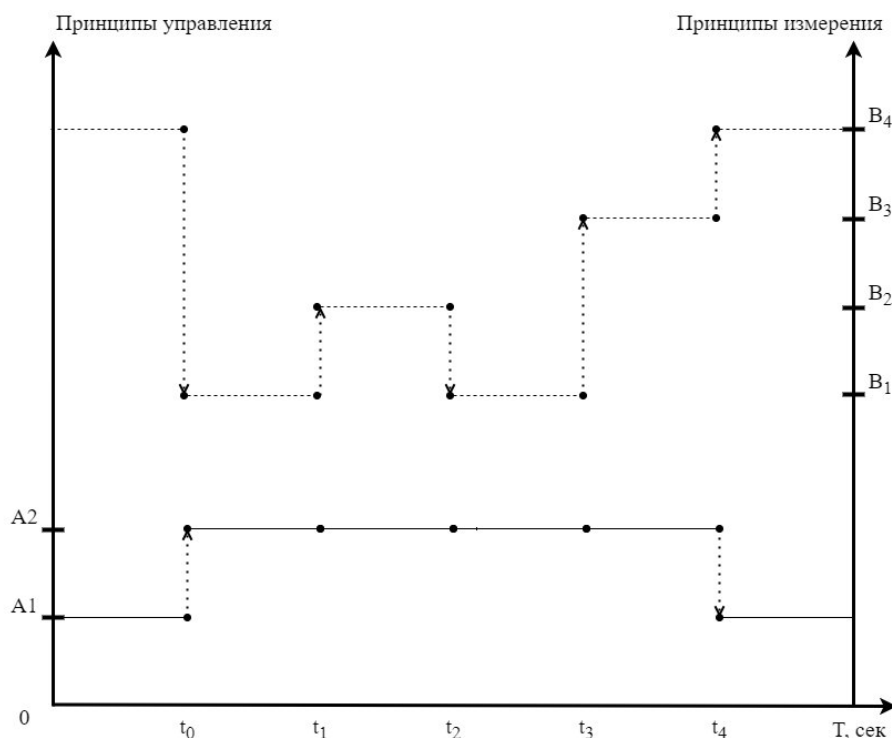


Рисунок 7 – Диаграмма сценария работы предлагаемой технологии, где: A₁ – управление по алгоритмам на основе ИМОИ, A₂ – управление по классическим алгоритмам, B₁ – прямые измерения с пирометров, B₂ – скорректированные с помощью ИНС_{корр}, B₃ – спрогнозированные с помощью ИНС_{прогноз}, B₄ – измерения с пирометров отсутствуют.

Список возможных событий, негативно влияющих на управление процессом ИП ВТКА, можно свести к следующим типам: возникновение погрешности, в корректировке которой нет необходимости; возникновение погрешности, которую можно и нужно скорректировать; отсутствие показаний с одного из пирометрических датчиков; отсутствие показаний со всех пирометрических датчиков.

Рассмотрим пример процесса, представленный на рисунке 7.

На участке от 0 до t₀ информация о температуре нагрева элементов сборки ВТКА отсутствует (температура ниже границы чувствительности пирометров), вследствие чего для управления применяется модель ИНС_{упр}.

На участке от t₀ до t₁ происходят прямые измерения температуры ТП, поэтому для управления возможно использовать классические алгоритмы (в частности, ПИД-регулятор).

В момент времени t₁, вследствие испарения флюса, с одного из пирометров начинает поступать некорректная информация из-за изменения излучательной способности материала в точке измерения. В этой ситуации определяется наличие погрешности с использованием ИНС_{идент}, а затем производится коррекция показаний пирометров с использованием ИНС_{корр}. Для управления используются классические алгоритмы – участок от t₁ до t₂ (момент времени, когда измерения восстанавливаются).

В момент времени t₃ происходит отказ одного из пирометров, вследствие чего его показания (измерения температуры) начинают прогнозироваться с использованием ИНС_{прогноз}.

В момент времени t_4 из-за неисправности происходит отказ сразу двух пирометров, что переводит систему в режим управления по модели ИНС_{упр} (аналогично режиму работы на участке до момента времени t_0).

В диссертации разработан обобщенный алгоритм управления ИП (рисунок 8) на основе ИМОИ, позволяющий осуществлять управление процессом ИП в условиях неполной, недостоверной, а также отсутствующей информации о ТП.

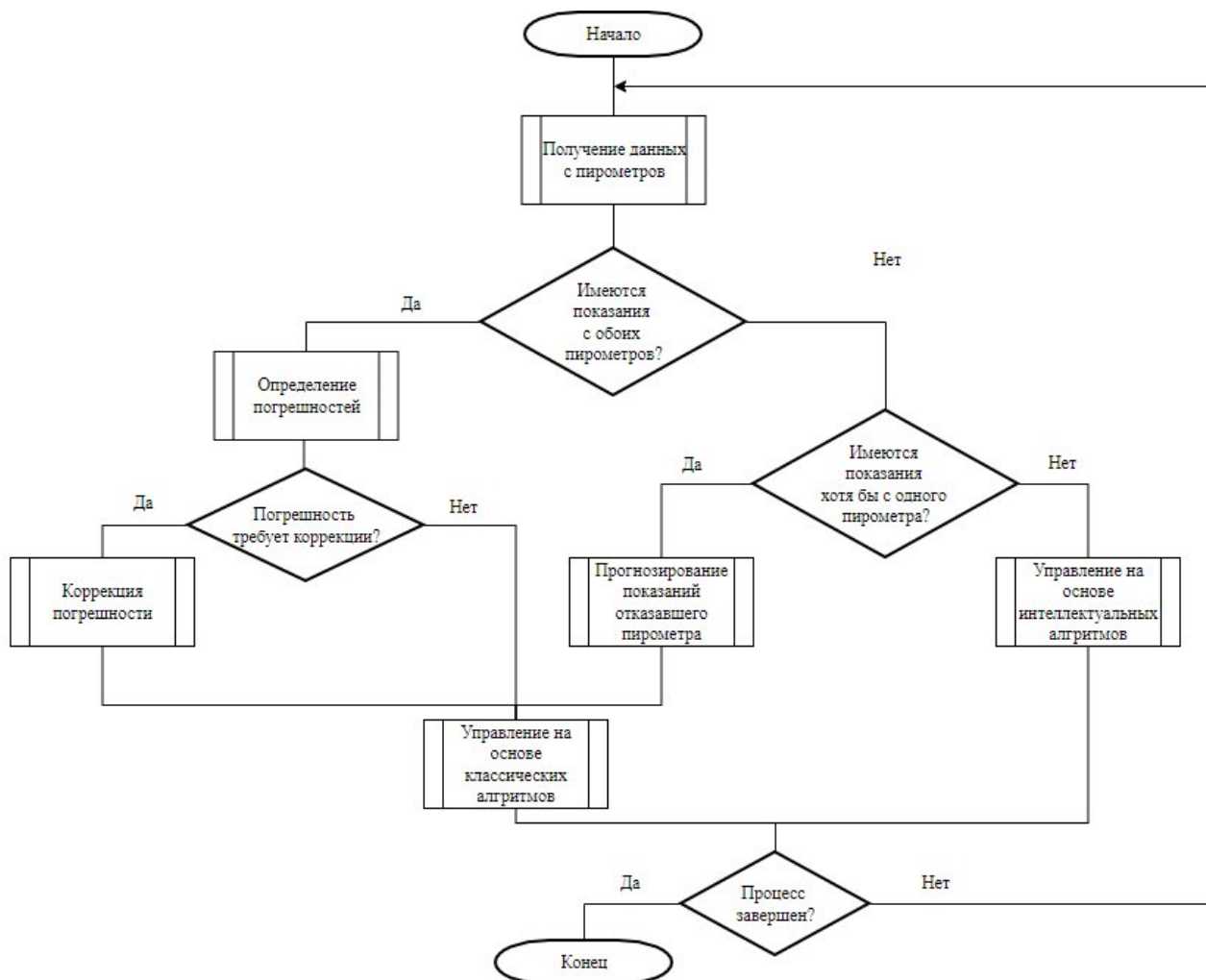


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма управления

С использованием многокритериального генетического алгоритма (ГА) FFGA были получены аппроксимации Парето-оптимальных множеств обученных ИНС для решения поставленных задач, среди которых были выбраны наилучшие структуры ИНС в смысле их точности, удовлетворяющие требованиям по вычислительной сложности (время работы ИНС не более 50 мс). Наилучшая структура ИНС_{идент}: 10 нейронов на входном слое, 10 нейронов на первом скрытом слое, 7 нейронов на втором скрытом слое, 6 нейронов на третьем скрытом слое, 4 нейрона на четвертом скрытом слое, 7 нейронов на пятом скрытом слое, 9 нейронов на шестом скрытом слое, 2 нейрона на выходном слое. Наилучшая структура ИНС_{корр}: 9 нейронов на входном слое, 6 нейронов на первом скрытом слое, 4 нейрона на втором скрытом слое, 10 нейронов на третьем скрытом слое, 10 нейронов на четвертом скрытом слое, 1 нейрон на пятом скрытом слое, 6 нейронов на шестом скрытом слое, 1 нейрон на выходном слое. Наилучшая структура ИНС_{прогноз}: 20 нейронов на входном слое, 6 нейронов на первом скрытом слое, 8 нейронов на втором скрытом слое, 4 нейрона на третьем скрытом слое, 10 нейронов на четвертом скрытом слое, 5 нейронов на пятом скрытом слое, 5 нейронов на шестом скрытом слое, 1 нейрон на выходном слое. Наилучшая структура ИНС_{упр}: 44 нейрона на входном слое,

7 нейронов на первом скрытом слое, 3 нейрона на втором скрытом слое, 6 нейронов на третьем скрытом слое, 1 нейрон на четвертом скрытом слое, 4 нейрона на пятом скрытом слое, 7 нейронов на шестом скрытом слое, 7 нейронов на седьмом скрытом слое, 3 нейрона на восьмом скрытом слое, 2 нейрона на выходном слое.

Разработанные ИНС с экспериментально подобранной наилучшей структурой позволяют производить: идентификацию погрешностей средств измерения в процессе ИП с точностью (под **точностью** в данном случае понимается **доля правильных ответов** алгоритма) 95,1%; коррекцию погрешностей средств измерения в процессе ИП ВТКА с точностью 96,6%; прогнозирование измерений в процессе ИП ВТКА с точностью 96,7%; интеллектуальное управление процессом ИП ВТКА в условиях отсутствия информации о процессе с точностью 94,5%.

Третья глава диссертации посвящена практической реализации разработанной технологии в виде программного обеспечения (ПО), а также проверке эффективности его применения.

Разработанное ПО включает в себя модуль определения наилучшей структуры ИНС, а также модуль управления ИП ВТКА. ПО разработано в рамках объектно-ориентированного подхода на языке программирования Python. Для разработки графического интерфейса выбран фреймворк PyQt5. Также используются библиотеки: Keras, TensorFlow, Pandas, Matplotlib и Bdaqctrl.

Программный модуль определения наилучшей структуры ИНС. Программный модуль реализует многокритериальный ГА FFGA, используемый для определения наилучшей структуры ИНС. ПО позволяет настраивать следующие параметры: диапазон количества скрытых слоев ИНС и количества нейронов в слоях; число индивидов в популяции; вид и параметры селекции; вид скрещивания; вероятность мутации; максимальное количество поколений. На рисунке 9 представлена структурная схема программного модуля.



Рисунок 9 – Структурная схема программного модуля

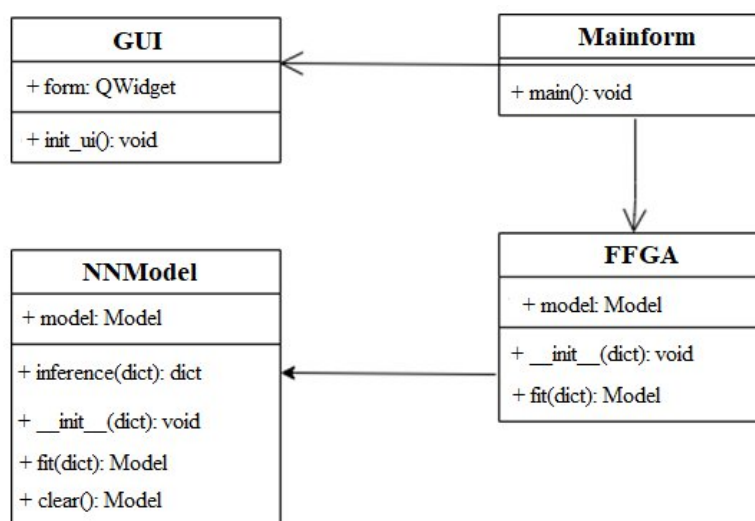


Рисунок 10 – Диаграмма классов программного модуля

Программный модуль управления ИП ВТКА на основе интеллектуальных методов обработки информации. В программном модуле реализована идентификация и коррекция погрешностей средств измерения, прогнозирование измерений отказавшего пирометрического датчика, а также управление ТП ИП в условиях отсутствия информации. ПО предоставляет следующие возможности: настройка параметров ТП ИП; настройка используемых ИНС; настройка пирометров; включение и отключение лазеров пирометров; запуск и остановка процесса пайки; вывод в реальном времени графиков температур нагрева элементов сборки в процессе пайки и сохранение в файл результатов; логирование режимов работы системы. На рисунках 11 и 12 представлены структурная схема и диаграмма классов программного модуля соответственно.

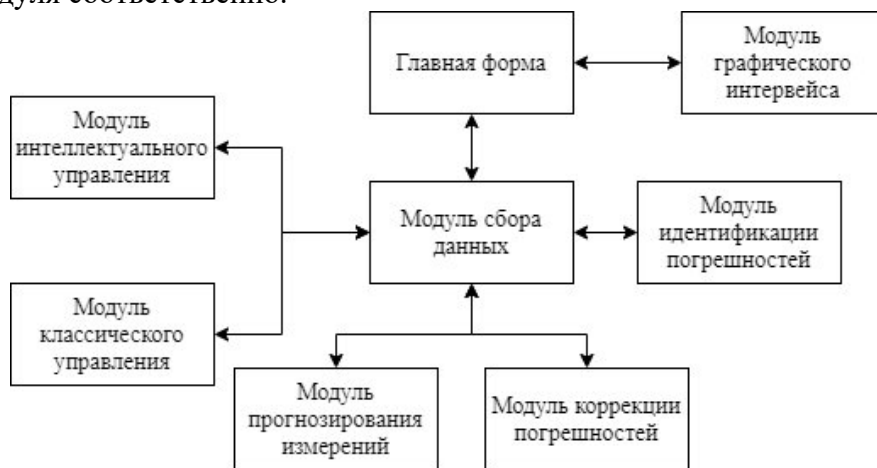


Рисунок 11 – Структурная схема программного модуля

Описание условий экспериментов. Для исследования эффективности работы интеллектуальной системы управления ИП ВТКА проведен ряд опытов на экспериментальном оборудовании. Эксперименты производились на следующем аппаратном обеспечении: процессор: AMD Ryzen 5 4500U, 2,38 ГГц, 6 ядер; оперативная память 8 ГБ; твердотельный накопитель на 512 ГБ (используется в качестве файла подкачки при необходимости).

Проверка эффективности программного обеспечения наилучшей структуры ИНС представлена во второй главе данной работы. С использованием данного модуля подобраны наилучшие структуры используемых ИНС.

Проверка эффективности программного обеспечения управления ИП на основе интеллектуальных методов обработки информации. В рамках экспериментов производилась пайка ВТКА типоразмеров 58 x 25 мм, 35 x 15 мм и 19 x 9,5 мм. На рисунке 13 изображен график с управлением ИП в случае корректировки измерений при помощи ИНС_{корр}. Всего было произведено 3 серии по 10 экспериментов для типоразмеров труб 58 x 25 мм, 35 x 15 мм и 19 x 9,5 мм. По всем сериям экспериментов **среднее время работы для ИНС_{идент}** составляло не более 13 мс, ИНС_{корр} не более 12 мс, ИНС_{прогноз} не более 12,5 мс, ИНС_{упр} не более 24 мс. Из рисунка 13 наглядно видно, что ИНС_{упр}, обрабатывающая на начальном этапе нагрева, обеспечивает минимальное расхождение между температурами нагрева элементов сборки ВТКА. Перед выходом на этап стабилизации происходит резкий выброс на графике температуры с корректирующего пирометра вследствие расплавления флюса. На данном этапе ИНС_{корр} производит коррекцию ненормативной погрешности, что обеспечивает минимальное расхождение нагрева элементов сборки ВТКА.

Качество управления обеспечивается следующими фактами: отсутствие перерегулирования на этапе стабилизации процесса; отсутствие значительной разницы температур нагрева паяемых элементов; низкая продолжительность процесса ИП ВТКА, что положительно сказывается на качестве выпускаемой продукции, т. к. снижается время нагрева. Продолжительность процесса снижается за счет того, что при управлении процессом с использованием ИМОИ возможно обеспечивать более высокую скорость нагрева.

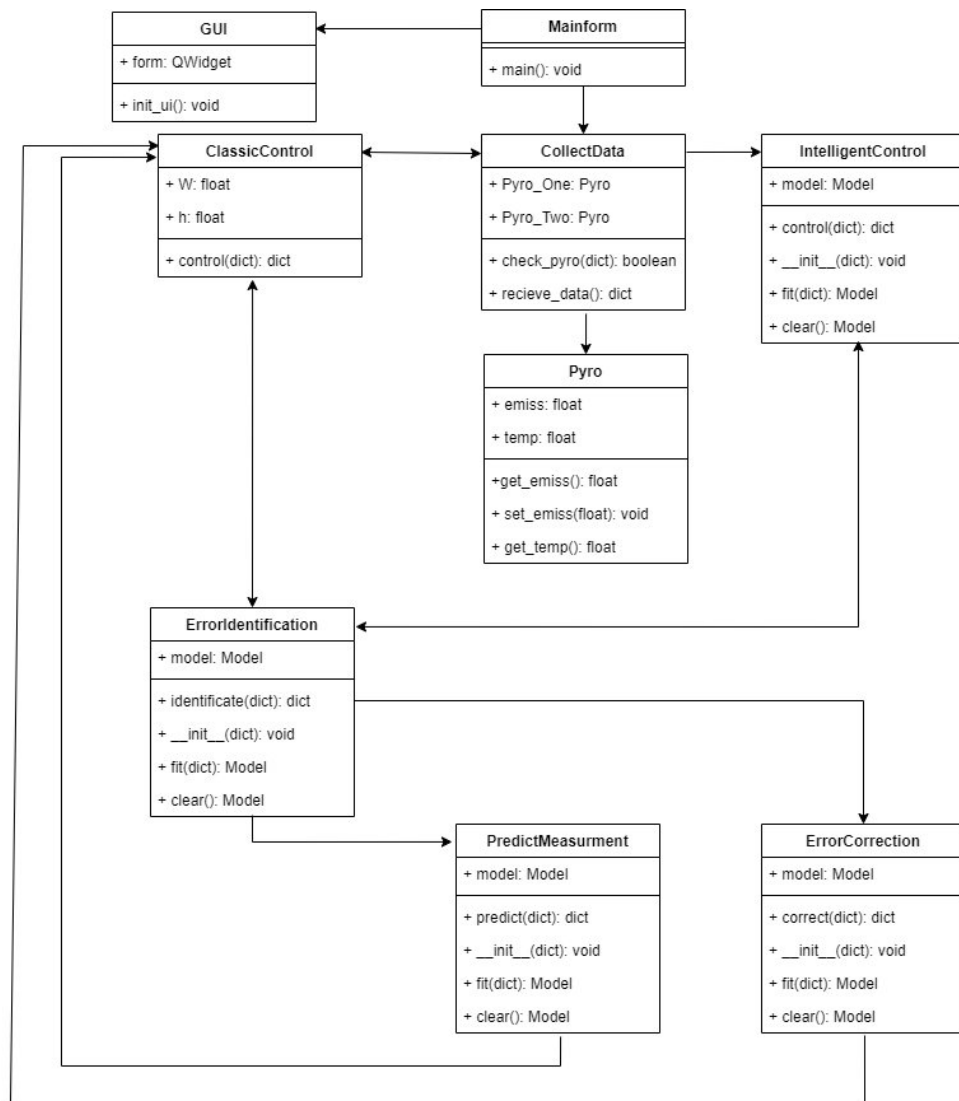


Рисунок 12 – Диаграмма классов программного модуля

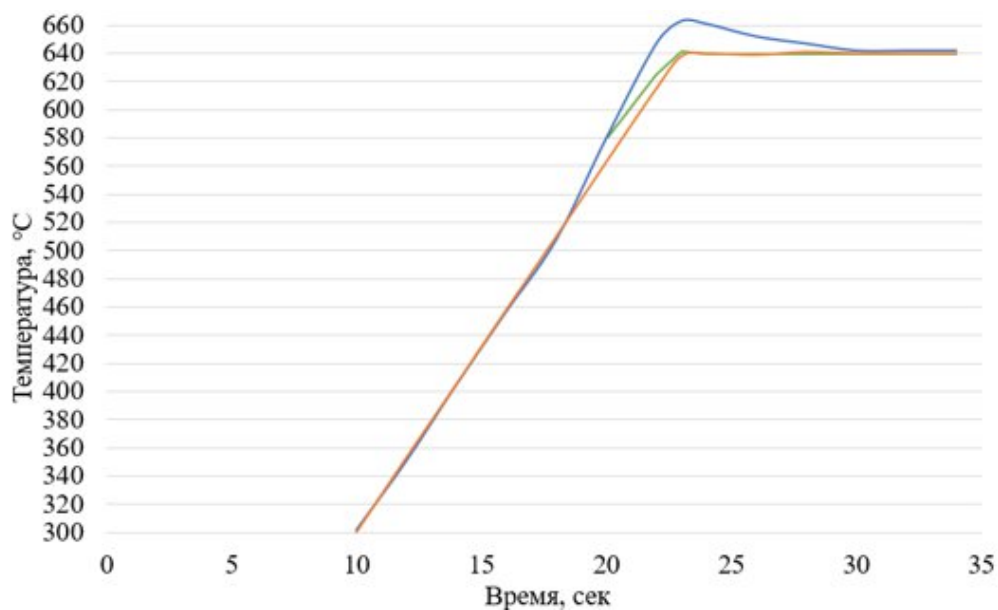


Рисунок 13 – График процесса управления ИП, где: синий график – действительные значения температуры, полученные с пирометра, направленного на фланец; оранжевый график – действительные значения температуры, полученные с пирометра, направленного на трубу; зеленый график – значения температуры, скорректированные с помощью ИНС_{корр}

По результатам всех экспериментов получены качественные паяные соединения. В таблице 2 представлено сравнение качества управления ИП ВТКА без использования ИМОИ и с использованием ИМОИ.

Таблица 2 – Сравнение качества управления ТП ИП ВТКА.

Критерий сравнения	Классическая технология	Интеллектуальная технология
Перерегулирование	0 – 20 % (в среднем – 12%)	0%
Разница температур нагрева элементов сборки ВТКА	20 – 100 °С (в среднем – 35 °С)	0 – 10 °С (в среднем – 8 °С)
Продолжительность процесса	50 – 60 сек (в среднем – 58 сек)	30 – 35 сек (в среднем – 32 сек)

На рисунке 14 представлены микрошлифы паяных волноводов, полученных по результатам экспериментов, из которых видно, что получены качественные паяные соединения, зоны проплавления основного материала отсутствуют.

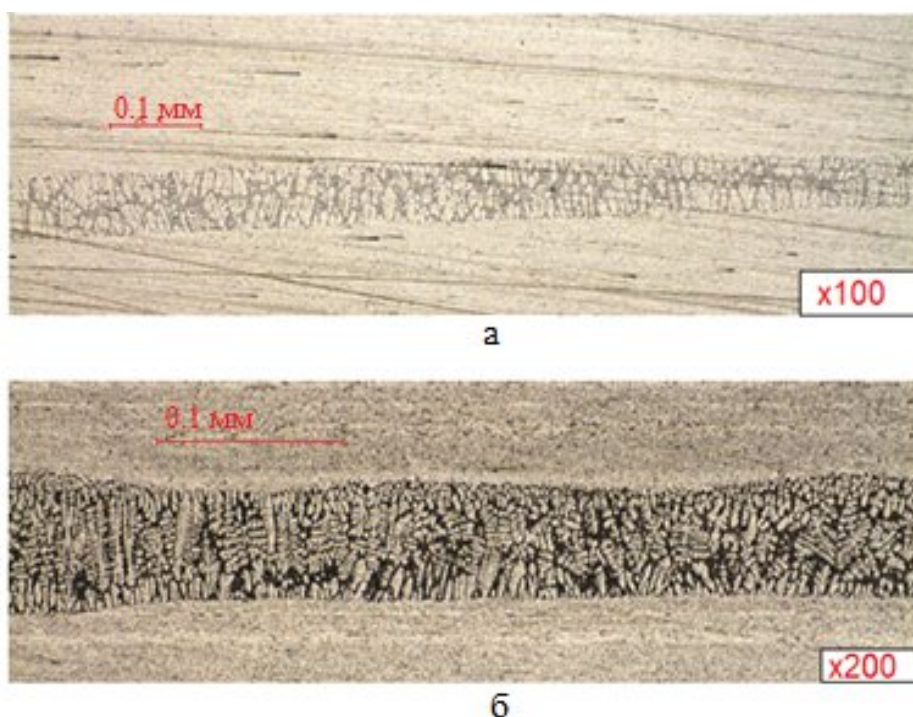


Рисунок 14 – Микрошлифы паяных волноводов, где: а – микрошлиф сборки с фланцем, б – микрошлиф сборки с муфтой.

Для проверки качества соединения производились механические испытания на 20 опытных образцах. Максимальная нагрузка, которую выдерживает паяное изделие, составила от 380,93 до 388,6 кгс по серии испытаний (в среднем – 386,3 кгс), что соответствует результатам при управлении классическими алгоритмами, а также соответствует технологическим требованиям – не менее 360 кгс. Таким образом можно сделать вывод, что по результатам экспериментов получены качественные паяные соединения.

Кроме того, управление процессом индукционной пайки, реализованное на основе интеллектуальных технологий, позволяет за короткое время компенсировать несоответствие процесса пайки программе нагрева и расхождение в температурах спаиваемых элементов, а также обеспечить равномерное протекание припоя по всему периметру соединения.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы.

В **приложении** представлены свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, а также акт о внедрении научных и практических результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Проведен анализ методов и средств управления технологическим процессом индукционной пайки и анализ эффективности различных интеллектуальных методов обработки информации для решения задачи идентификации погрешностей средств измерения. Обосновано предположение о возможности эффективного использования данного подхода для решения задач коррекции погрешностей средств измерения, прогнозирования измерений, а также управления индукционной пайкой ВТКА в условиях отсутствия оперативной информации о технологическом процессе. Результат анализа показал, что эффективным интеллектуальным методом для решения поставленных задач является подход на основе искусственных нейронных сетей.

2. Разработана технология интеллектуализации процесса индукционной пайки волноводных трактов на основе взаимодействия предварительно обученных искусственных нейронных сетей, позволяющая повысить качество управления индукционной пайкой посредством: снижения влияния погрешностей средств измерения; реализации управления индукционной пайкой ВТКА с требуемым качеством в условиях недостоверной, неполной, а также отсутствующей оперативной информации о технологическом процессе.

3. Произведена практическая реализация разработанной технологии интеллектуального управления процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов в виде программного обеспечения. Представлено описание разработанных программных продуктов в виде структурных схем, диаграмма классов, блок-схем алгоритмов и экранных форм. В качестве языка программирования использовался язык Python. Также использованы библиотеки для реализации генетических алгоритмов и нейросетевых моделей. Программное обеспечение разработано в рамках объектно-ориентированного подхода.

4. Произведена проверка работоспособности программного обеспечения интеллектуального управления индукционной пайкой ВТКА. Проверка работоспособности производилась в виде ряда опытов на экспериментальном оборудовании. По результатам всех экспериментов получены качественные паяные соединения. По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что сформированное интеллектуальное управление позволяет за короткое время компенсировать несоответствие процесса пайки программе нагрева, а также расхождение в температурах спаиваемых элементов и обеспечить равномерное протекание припоя по всему периметру соединения. Во всех экспериментах получены качественные паяные соединения. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение представленной в рамках работы интеллектуальной технологии позволит повысить качество управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов.

Таким образом, все задачи диссертационного исследования решены и цель достигнута.

В качестве направлений для дальнейших исследований следует отметить следующие:

1. Распространение предложенного подхода к управлению технологическими процессами схожей природы, например, такими как, электронно-лучевая сварка, диффузионная сварка и т. д.

2. Адаптация и применение группы интеллектуальных технологий с использованием других типов искусственных нейронных сетей, например, конволюционных искусственных нейронных сетей для обработки визуальной информации о технологическом процессе индукционной пайки, а также карт Кохонена для кластеризации множества различных измерительных приборов.

Публикации по теме работы

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Милов, А. В. Автоматизированная система тестирования алгоритмов управления процессом индукционной пайки волноводных трактов / В. С. Тынченко, А. В. Милов, С. О. Курашкин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – № 1. – С. 3–13.
2. Милов А.В. Математическое обеспечение управления индукционной пайкой на основе интеллектуальных методов обработки информации // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – № 3(85). – С. 81–87.
3. Милов А. В., Тынченко В. С., Курашкин С. О. Применение коллектива искусственных нейронных сетей для управления индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 72–82.
4. Милов А. В. Программное обеспечение управления индукционной пайкой на основе интеллектуальных методов обработки информации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 9. – С. 34–38.
5. Милов, А. В. Программное обеспечение идентификации и коррекции ненормативных погрешностей средств измерений в процессе индукционной пайки / В. С. Тынченко, А. В. Мурыгин, А. В. Милов // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – № 3. – С. 502–509.
6. Милов, А. В. Система автоматизации индукционной пайки на основе двух контуров управления с позиционированием заготовки / В. С. Тынченко, В. Д. Лаптенко, В. Е. Петренко, А. В. Мурыгин, А. В. Милов // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32. – № 1. – С. 167–173.
7. Милов, А. В. Методы интеллектуального управления индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов / А. В. Милов, В. С. Тынченко // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. – № 11. – С. 18–29.
8. Милов, А. В. Управление индукционной пайкой на основе косвенных измерений температуры процесса / В. С. Тынченко, В. Е. Петренко, А. В. Милов // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 4. – С. 50–54.
9. Милов, А. В. Двухконтурное управление индукционной пайкой волноводных трактов из алюминиевых сплавов / В. С. Тынченко, В. Д. Лаптенко, В. Е. Петренко, А. В. Милов, А. В. Мурыгин // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 4. – С. 65–71.
10. Милов, А. В. Применение методов нечеткой логики для автоматизации процесса индукционной пайки / В. С. Тынченко, В. Е. Петренко, А.В. Милов, А. В. Мурыгин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 2 (58). – С. 45–56.
11. Милов, А. В. Интеллектуальное управление технологическим процессом индукционной пайки / А. В. Милов, В. С. Тынченко, А. В. Мурыгин // Перспективы науки. – 2018. – № 12. – С. 42–45.

Публикации в изданиях, входящих в Web of Science и Scopus:

12. Milov, A. V. Mathematical model of the waveguide pipe heating in the process of induction brazing / V. S. Tynchenko, A. V. Milov, S. O. Kurashkin, V. E. Petrenko, Ya. A. Tynchenko, D. V. Rogova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2021. – Vol. 1047. – No. 1. – P. 012112.
13. Milov, A. V. The induction heating process modelling of the waveguide paths' flanges / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, S. O. Kurashkin, V. E. Petrenko, D. V. Rogova, Ya. A. Tynchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2021. – Vol. 1047. – No. 1. – P. 012027.
14. Milov, A. V. Algorithms for selecting the operating mode of the technological process of waveguidepaths induction brazing / V. S. Tynchenko, A. V. Milov, V. V. Kukartsev, V. V. Bukhtoyarov, V. V. Tynchenko, K. A. Bashmur // Journal of Applied Engineering Science. – 2021. – Vol. 19. – No. 2. – С. 424-431.

15. Milov A. V. The Use of Collections of Artificial Neural Networks to Improve the Control Quality of the Induction Soldering Process / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, S. O. Kurashkin, V. V. Tynchenko, V. V. Kukartsev, V. V. Bukhtoyarov, R. B. Sergienko, V. A. Kukartsev, K. A. Bashmur // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – No. 12. – P. 4199.
16. Milov, A. V. Control intellectualization of the induction soldering process for creating permanent joints / V. S. Tynchenko, A. V. Milov, A. V. Murygin, S. O. Kurashkin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 919. – Article ID 042028.
17. Milov, A. V. Software for Structure Selection of an Artificial Neural Network to Control the Induction Soldering Process / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, V. V. Bukhtoyarov, V. V. Tynchenko, V. V. Kukartsev // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1295. – P. 480–490.
18. Milov, A. V. Experimental Verification of Flux Effect on Process of Aluminium Waveguide Paths Induction Soldering / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, A. V. Murygin // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 641. – P. 282–291.
19. Milov, A. V. Algorithmic and Software Support for Technological Decision-Making in the Process of Induction Soldering / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, V. E. Petrenko, S. O. Kurashkin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1224. – P. 521–530.
20. Milov, A. V. Mathematical Software for Testing and Setting up the Induction Soldering Process / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, V. E. Petrenko, V. V. Kurartsev // *International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production*. – Springer, Cham. – 2020. – P. 114–124.
21. Milov, A. V. Neural network modeling to control process of induction soldering / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, A. V. Murygin // *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – 2019. – P. 1–5.
22. Milov, A. V. Intelligently informed control over the process variables of oil and gas equipment maintenance / V. V. Bukhtoyarov, V. S. Tynchenko, E. A. Petrovskiy, S. V. Tynchenko, A. V. Milov // *International Review of Automatic Control*. – 2019. – Vol. 12. – No. 2 – P. 59–66.
23. Milov, A. V. Intellectualizing the process of waveguide tracks induction soldering for spacecrafts / V. S. Tynchenko, A. V. Milov, V. V. Tynchenko, V. V. Bukhtoyarov, V. V. Kukartsev // *International Review of Aerospace Engineering*. – 2019. – Vol. 12. – No. 6 – P. 280–289.
24. Milov, A. V. Intellectual Control of Induction Soldering Process using Neuro-fuzzy Controller / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, V. E. Petrenko // *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – 2019. – P. 1–6.
25. Milov, A. V. Control of the technological process of the waveguide paths induction soldering in the framework of Industry 4.0 / V. S. Tynchenko, A. V. Milov, V. V. Bukhtoyarov, V. V. Kukartsev, V. V. Tynchenko, K. A. Bashmur // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1399. – Article ID 044087.
26. Milov, A. V. Application of artificial neural networks for identification of non-normative errors in measuring instruments for controlling the induction soldering process / V. S. Tynchenko, A. V. Milov, V. V. Tynchenko, V. V. Bukhtoyarov, O. A. Antamoshkin // *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018. GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 18. – P. 117–124.
27. Milov, A. V. Algorithmic and software to identify errors in measuring equipment during the formation of permanent joints / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, V. E. Petrenko // *2018 International Multi-Conference FarEastCon*. – 2018. – P. 1–5.
28. Milov, A. V. Use of artificial neural networks to correct non-standard errors of measuring instruments when creating integral joints / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, V. V. Kukartsev, V. V. Tynchenko, V. V. Bukhtoyarov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1118. – Article ID 012037.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

29. Милов, А. В. Модуль идентификации ненормативных погрешностей измерений в процессе индукционной пайки / А. В. Милов, В. С. Тынченко, А. В. Мурыгин // М.: РОСПАТЕНТ. – 2018. Свидетельство № 2018664274 от 14.11.2018.

30. Милов, А. В. Модуль коррекции ненормативных погрешностей измерений в процессе индукционной пайки / А. В. Милов, В. С. Тынченко, А. В. Мурыгин, В. Е. Петренко // М.: РОСПАТЕНТ. – 2019. Свидетельство №2019666589 от 12.12.2019.

31. Милов, А. В. Модуль определения оптимальной структуры искусственной нейронной сети для решения задачи управления технологическим процессом индукционной пайки / А. В. Милов, В. С. Тынченко, А. В. Мурыгин, В. Е. Петренко // М.: РОСПАТЕНТ. – 2020. Свидетельство №2020664781 от 18.11.2020.

32. Милов, А. В. Модуль оптимизации параметров технологического процесса индукционной пайки / А. В. Милов, В. С. Тынченко, С. О. Курашкин, В. Е. Петренко // М.: РОСПАТЕНТ. – 2020. Свидетельство №2020664781 от 18.12.2020.