

УДК 004.896

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-72-82

Применение коллектива искусственных нейронных сетей для управления индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов

А. В. Милов, аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

В. С. Тынченко, кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

С. О. Курашкин, аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

В данной статье рассматривается разработка интеллектуальной технологии, предназначенной для решения задачи управления процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов. Решение данной задачи осложняется особенностями, обусловленными использованием бесконтактных датчиков измерения температуры. Интеллектуальные методы хорошо себя зарекомендовали при решении задач управления в условиях неопределенности. Использование интеллектуальных методов хорошо подходит как для решения задач идентификации и коррекции погрешностей средств измерения, так и для непосредственного управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических летательных аппаратов. Суть предлагаемой технологии заключается в применении коллектива искусственных нейронных сетей для решения задачи управления процессом индукционной пайки на следующих его этапах: оценка качества измерений температуры в зоне нагрева, получаемых при помощи пирометрических датчиков; коррекция измерений в случае обнаружения ненормативных погрешностей в измерительных средствах; управление процессом индукционного нагрева при отсутствии надежных показаний измерительных средств. В статье описываются структуры искусственных нейронных сетей, предлагаемые для решения поставленных задач управления, блок-схема алгоритма интеллектуального управления, а также результаты экспериментальных исследований эффективности применения предложенного подхода. Использование представленной интеллектуальной технологии позволит повысить качество управления процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов.

Ключевые слова: индукционная пайка, волноводные тракты, интеллектуальные технологии, искусственные нейронные сети, управление.

Введение

При производстве волноводных трактов космических аппаратов для создания высококачественных неразъемных соединений чаще всего используется технология индукционной пайки (ИП). Использование такого высокотехнологичного метода обусловлено высокими требованиями к качеству выпускаемой продукции. Использование ИП при соединении элементов сборки волноводного тракта позволяет для готовой продукции обеспечить соответствие требованиям к радиотехническим характеристикам, уменьшить массово-габаритные показатели, что в свою очередь позволит снизить затраты на производство. Управление технологическим процессом (ТП) ИП происходит в условиях неопределенности. Условия неопределенности вызваны наличием множества негативных факторов, связанных в основном с использованием бесконтактных датчиков измерения температуры [1].

Вышеуказанные проблемы управления ТП ИП могут быть решены в результате внедрения интеллектуальных технологий обработки информации и принятия решений в условиях неопределенности. Примерами успешного применения интеллектуальных методов могут являться: управление производством интеллектуальных электроприводов [2], при производстве авиационных двигателей [3], адаптивное управление станками [4], управление системами металлургического производства [5], управление бестарным хранением муки [6], управление ТП сварки [7] и т. д. [8–10]. Использование интеллектуальных методов позволяет проводить оценку достоверности получаемой из зоны нагрева информации, оценивать погрешности средств измерения и формировать адекватное управление ТП с целью повышения его точности и повторяемости [11].

Целью данной работы является представление интеллектуальной технологии управления

процессом ИП волноводных трактов космических аппаратов (ВТКА). Рассматриваемая интеллектуальная технология предназначена для обеспечения всех этапов работы ТП ИП, начиная с первоначальной настройки технологических параметров, заканчивая динамическим переключением режимов работы конкретной системы, реализованной на базе предлагаемой технологии, соответственно, текущего состояния ТП. Суть предлагаемой технологии заключается в функционировании на протяжении всего технологического процесса обученной искусственной нейронной сети, анализирующей информацию по температуре процесса, поступающую со средств измерения температуры (бесконтактных пирометрических датчиков), результатом работы которой является определение наличия некорректной информации, а также возможности ее корректировки с применением другой заранее обученной искусственной нейронной сети.

Использование представленной в рамках данной работы интеллектуальной технологии позволит значительно повысить качество управления ТП ИП ВТКА за счет снижения издержек, связанных с особенностями ТП и бесконтактных датчиков измерения температуры.

Интеллектуальная технология

Разрабатываемая технология предназначена для управления процессом индукционной пайки волноводных трактов. Функциональная схема установки, используемой в рассматриваемом технологическом процессе, представлена на рис. 1. Установка состоит из блока управления, промышленного компьютера ИРРС-9171G-07ВТО, интерфейсной платы РСІ-1710, двух пирометрических датчиков измерения температуры, генератора индукционного нагрева, согласующего устройства, электро-механического привода, а также индуктора. Съем температуры осуществляется с различных элементов сборки ВТКА: один пирометр («Пирометр 1») измеряет температуру трубы ВТКА, а другой («Пирометр 2») – температуру фланца либо муфты ВТКА.

Принцип разрабатываемой интеллектуальной технологии заключается в функционировании на протяжении всего процесса пайки предварительно обученной искусственной нейронной сети (ИНС_{идент}), анализирующей информацию о температуре элементов сборки ВТКА, поступающую со средств измерения.

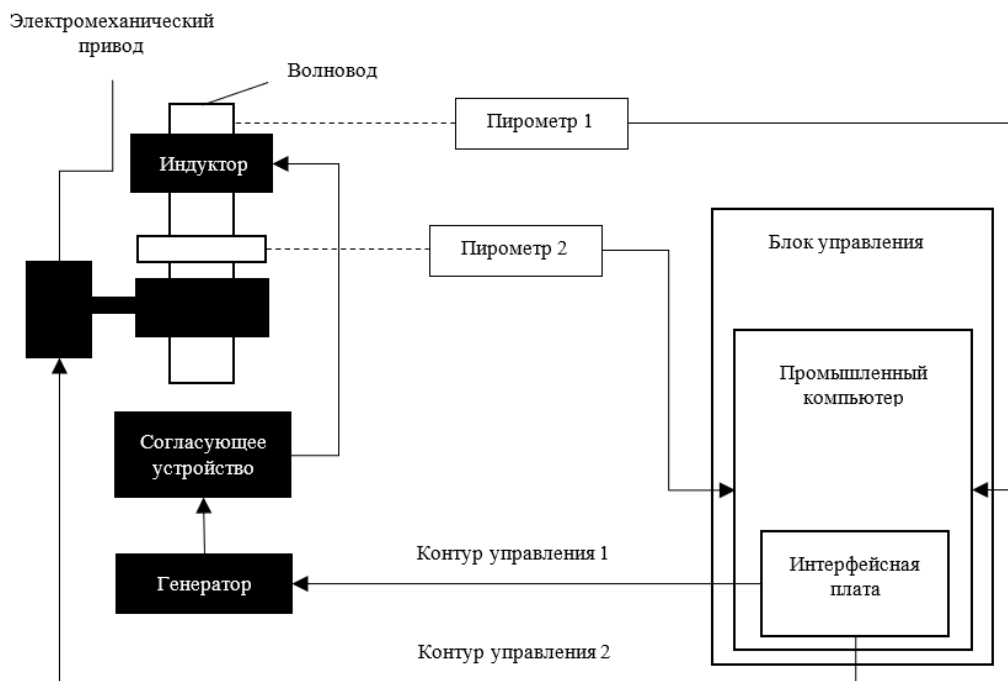


Рис. 1. Функциональная схема установки индукционной пайки

Технология позволяет определять наличие некорректной информации о ТП, а также наличие возможности ее корректировки с приме-

нием другой заранее обученной искусственной нейронной сети (ИНС).

Типовой сценарий работы предлагаемой технологии представлен на рис. 2.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: A1 – интеллектуальное управление, A2 – управление по классическим алгоритмам, B1 – прямые измерения с пирометров, B2 – скорректированные с помощью ИНС измерения, B3 – спрогнозированные с помощью ИНС измерения, B4 – измерения с пирометров отсутствуют.

В моменты времени $T = (t_1, \dots, t_n)$ происходит одно из возможных событий в ТП ИП ВТКА, приводящих к ошибкам в работе системы управления, основывающейся на классических алгоритмах управления, в частности ПИД-регуляторе.

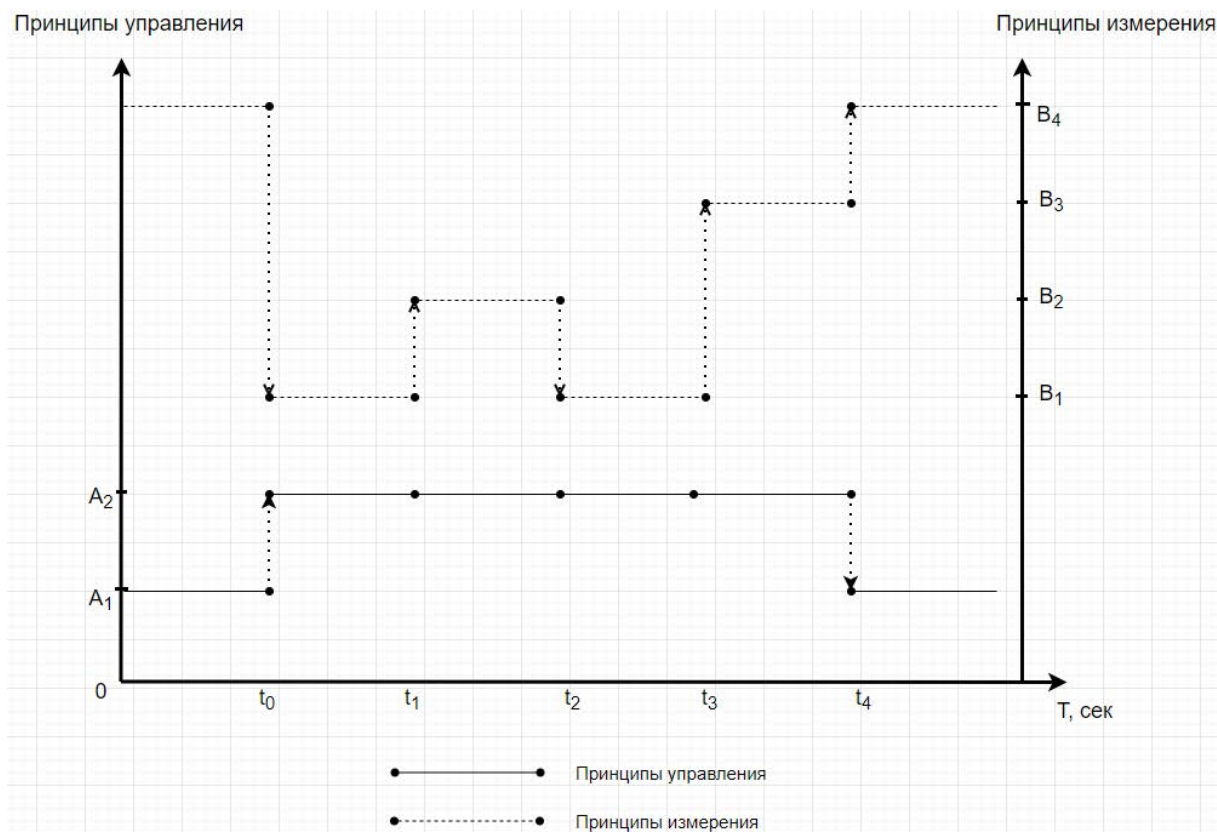


Рис. 2. Диаграмма сценария работы предлагаемой технологии

Список возможных событий можно свести к следующим типам:

- 1) возникновение нормативной погрешности, в корректировке которой нет необходимости;
- 2) возникновение ненормативной погрешности, которую можно скорректировать;
- 3) отсутствие показаний с одного из пирометрических датчиков;
- 4) отсутствие показаний со всех пирометрических датчиков.

Рассмотрим пример процесса, представленный на рис. 2.

На участке до t_0 (достижение нагреваемым изделием температуры, соответствующей нижней границе измерения пирометров) контроля температуры не производится, поэтому для управления предлагается применение интел-

лектуального алгоритма – заранее обученной ИНС для управления (ИНС_{упр}).

На участке от t_0 до t_1 происходят нормальные измерения температуры технологического процесса, а для управления используются классические алгоритмы, в частности ПИД-регулятор.

В момент времени t_1 вследствие испарения флюса с одного из пирометров начинает поступать некорректная информация из-за изменения излучательной способности материала в точке измерения. В этой ситуации интеллектуальная система производит коррекцию показаний с пирометров с использованием другой предварительно обученной ИНС для коррекции (ИНС_{корр}), а для управления используются классические алгоритмы – участок от t_1 до t_2 (момент времени, когда измерения восстанавливаются).

В момент времени t_3 происходит отказ одного из пирометров. Так как показания с одного из пирометрических датчиков отсутствуют, то интеллектуальная система начинает прогнозирование измерений с использованием еще одной предварительно обученной ИНС (ИНС_{прогноз}). В момент времени t_4 происходит отказ сразу двух пирометров. В данной ситуации система переходит в интеллектуальный режим управления, аналогично режиму работы на участке до момента времени t_0 .

Алгоритм управления процессом индукционной пайки на основе интеллектуальных технологий

Блок-схема алгоритма управления в рамках разрабатываемой интеллектуальной технологии представлена на рис. 3.

На начальном этапе интеллектуального управления процессом ИП ВТКА происходит

получение данных с пирометрических датчиков измерения температуры. Если оба датчика выдают данные о температуре технологического процесса, то происходит идентификация погрешностей. В случае отсутствия погрешностей либо при наличии нормативных погрешностей данные передаются далее для управления ТП на основе классических алгоритмов управления.

При наличии ненормативных погрешностей производится их коррекция с дальнейшей передачей данных для управления на основе классических алгоритмов. При отсутствии показаний с одного из пирометров данные второго датчика определяются на основе прогноза, полученного с помощью ИНС_{прогноз}, при этом управление также производится на основе классических алгоритмов управления.

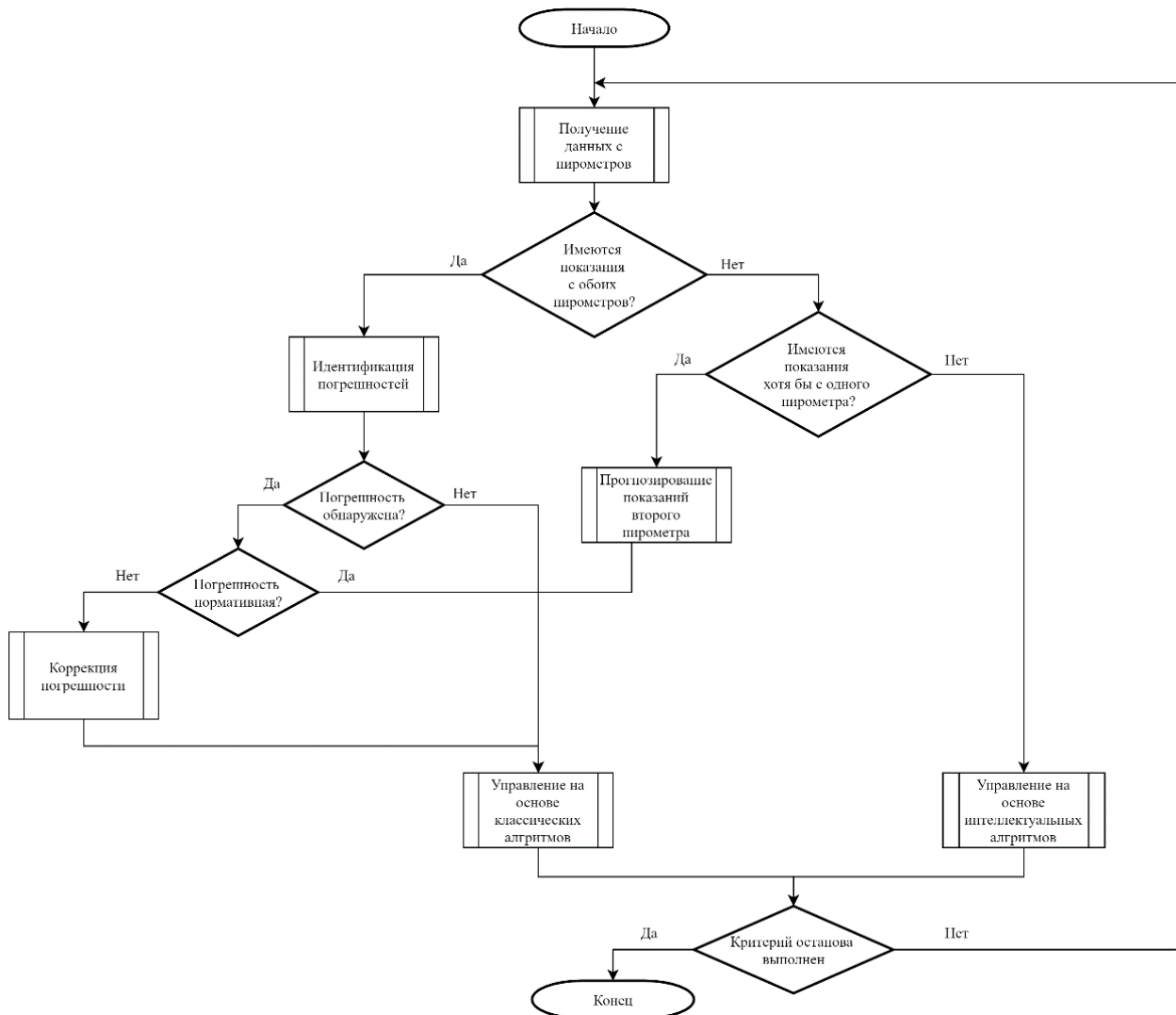


Рис. 3. Алгоритм интеллектуального управления процессом индукционной пайки ВТКА

Если отсутствуют данные с обоих пирометрических датчиков, то управление осуществляется на основе ИНС_{упр}. Признаком остановки процесса управления является истечение времени стабилизации температуры изделия, производящейся на заключительном этапе технологического процесса индукционной пайки ВТКА.

На рис. 4 представлена структура искусственной нейронной сети для идентификации погрешностей средств измерения (ИНС_{идент}).

На рис. 4 введены следующие обозначения: T_1, \dots, T_n – входные данные, представляющие собой временной ряд данных технологического процесса пайки – температура одного из спаиваемых элементов, Pr – выходной класс, означающий наличие погрешности, Corr – выходной класс, означающий нормативность погрешности.

На рис. 5 представлена структура искусственной нейронной сети для коррекции погрешностей средств измерения (ИНС_{корр}).

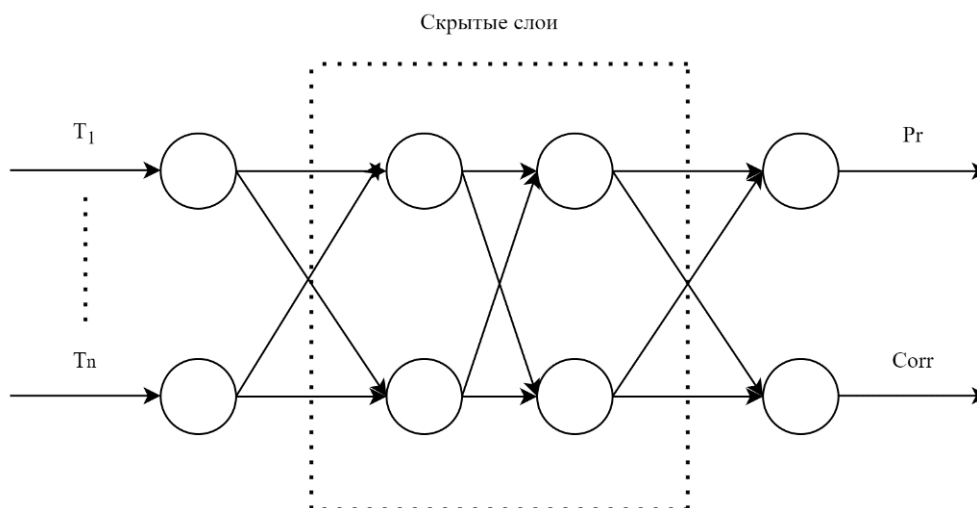


Рис. 4. Структура искусственной нейронной сети идентификации погрешностей

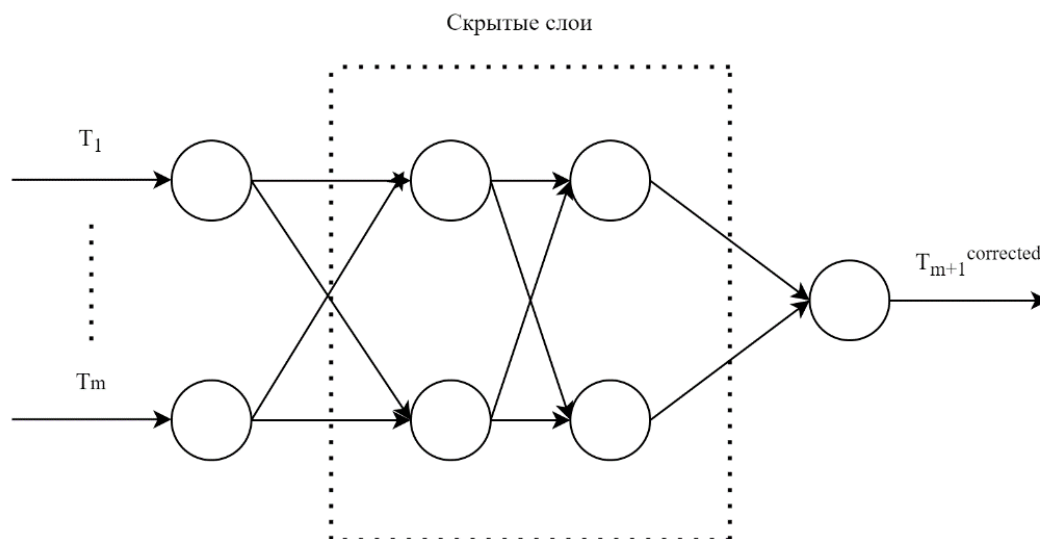


Рис. 5. Структура искусственной нейронной сети коррекции погрешностей

На рис. 5 введены следующие обозначения: T_1, \dots, T_m – входные данные, представляющие собой временной ряд данных технологического процесса пайки – температура одного из спаиваемых элементов, $T_{m+1}^{corrected}$ – выходное значение, представляющее собой скорректированное измерение.

На рис. 6 представлена структура искусственной нейронной сети для прогнозирования (ИНС_{прогноз}) значения с отказавшего пирометра.

На рис. 6 введены следующие обозначения: $T_1^{ctrl}, \dots, T_m^{ctrl}$ – входные данные, представляющие собой временной ряд данных с управляющего пирометра, $T_1^{corr}, \dots, T_m^{corr}$ – входные дан-

ные, представляющие собой временной ряд данных с управляющего пирометра, T_{m+1}^{predict} –

выходное значение, представляющее собой спрогнозированное измерение.

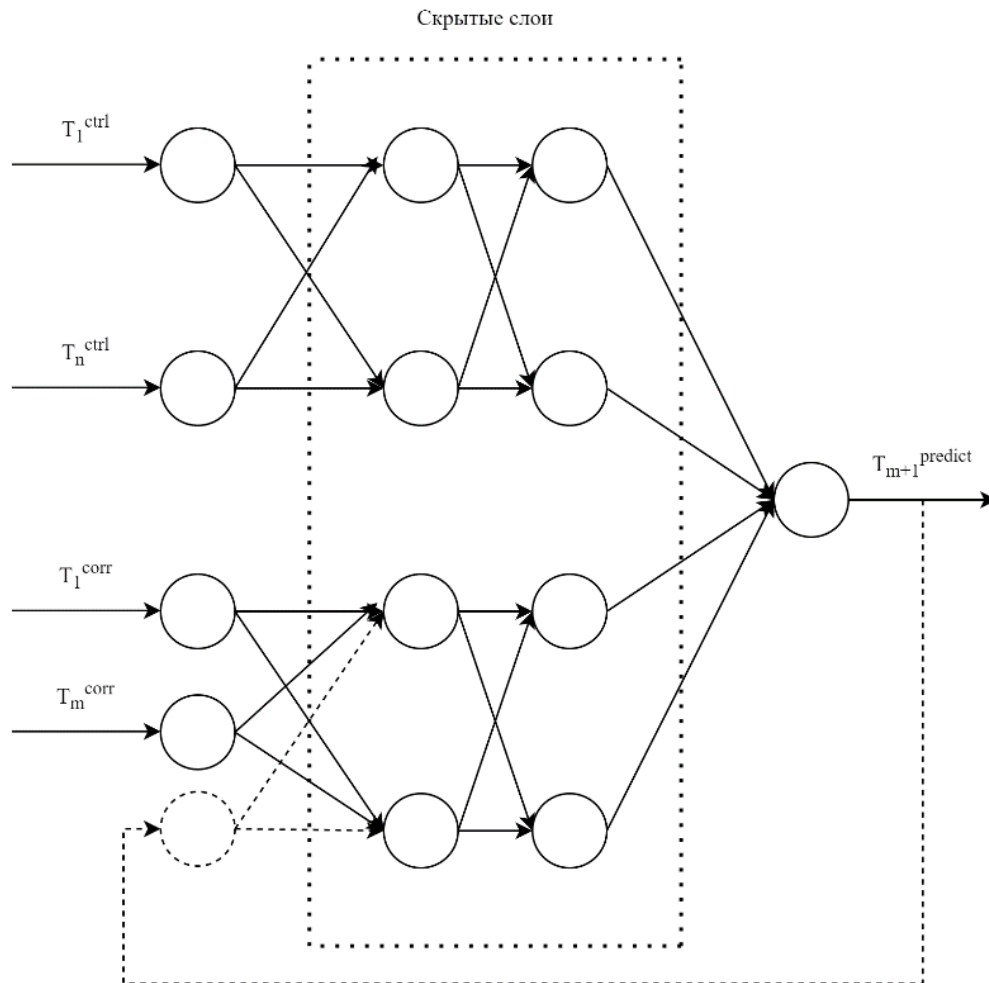


Рис. 6. Структура искусственной нейронной сети для прогнозирования измерений

С течением времени точность прогнозирования будет постепенно снижаться, так как в числе входных данных будет увеличиваться доля спрогнозированных, а не действительных значений.

На рис. 7 представлена структура искусственной нейронной сети для интеллектуального управления (ИНС_{упр}).

На рис. 7 введены следующие обозначения: $T_1^{p1}, \dots, T_n^{p1}$ – входные данные, представляющие собой временной ряд измерений первого пирометра, $T_1^{p2}, \dots, T_m^{p2}$ – входные данные, представляющие собой временной ряд измерений второго пирометра, h_1, \dots, h_k – входные данные, представляющие собой временной ряд значений от индуктора до сборки волнового тракта, W_1, \dots, W_k – входные данные,

представляющие собой временной ряд значений уставок мощности, h_{k+1} – выход ИНС, представляющий собой вычисленное значение расстояния от индуктора до заготовки, W_{k+1} – выход ИНС, представляющий собой вычисленное значение уставки мощности индуктора.

При этом на начальном этапе интеллектуального управления используются действительные измерения температуры, но со временем все больше поступающих данных будут представлять спрогнозированные с использованием ИНС_{прогноз}. Точно так же действительные значения уставок мощности и расстояния от индуктора до заготовки будут заменяться на спрогнозированные значения.

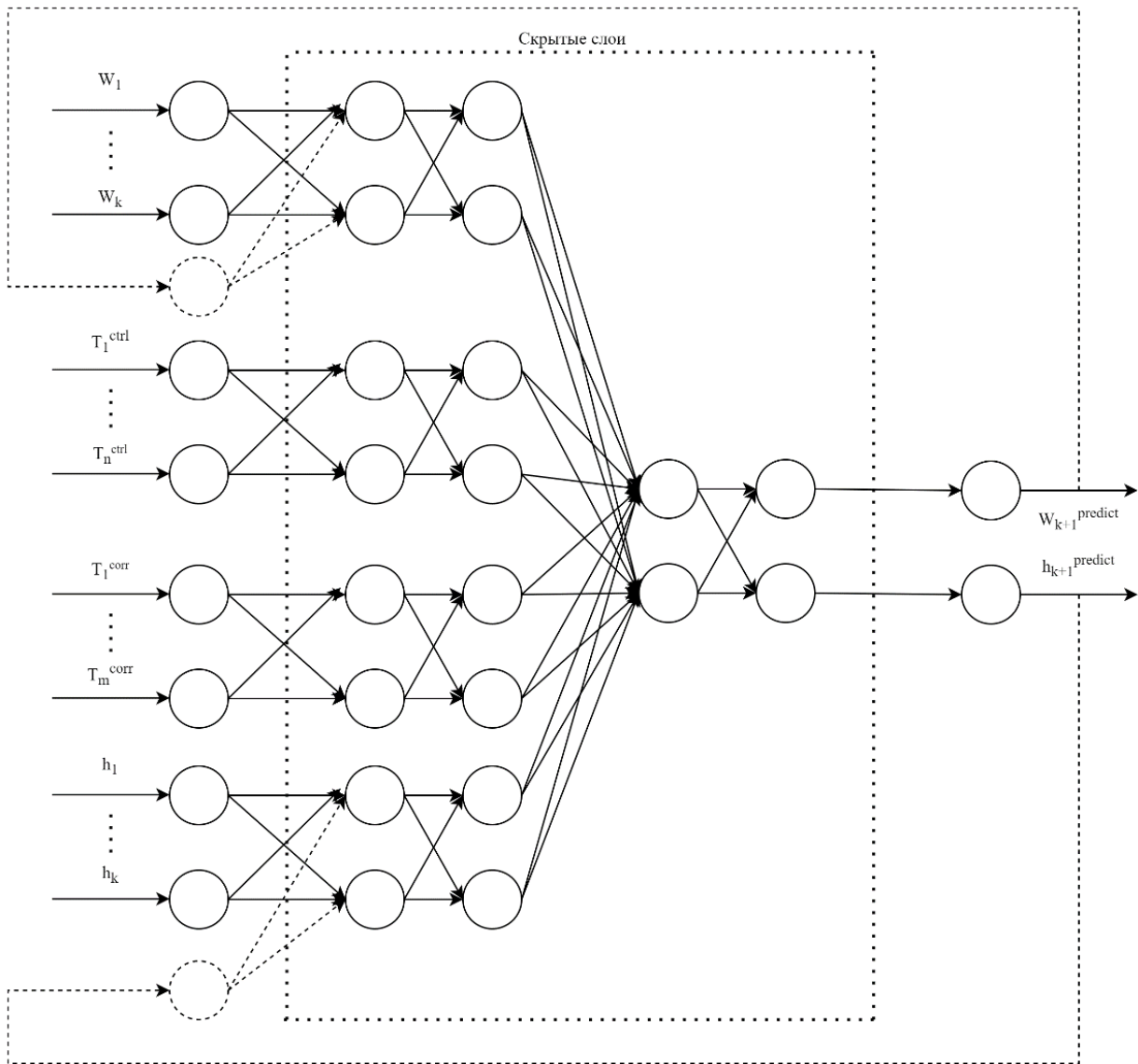


Рис. 7. Структура искусственной нейронной сети для управления

Глубины окон n , m , k представляют собой оптимальное количество измерений, необходимых для решения поставленных задач. Данные значения определяются эмпирическим путем.

Совместное использование описанных предварительно обученных ИНС позволит производить управление технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов с учетом коррекции выявленных ненормативных погрешностей, а также доводить

технологический процесс до конца в случае отказа обоих бесконтактных датчиков измерения температуры.

Апробация результатов

Для исследования эффективности работы интеллектуальной системы управления индукционной пайкой волноводных трактов проведен ряд опытов на экспериментальном оборудовании. На рис. 8 изображен график с управлением индукционной пайкой при отсутствии погрешностей в измерениях.

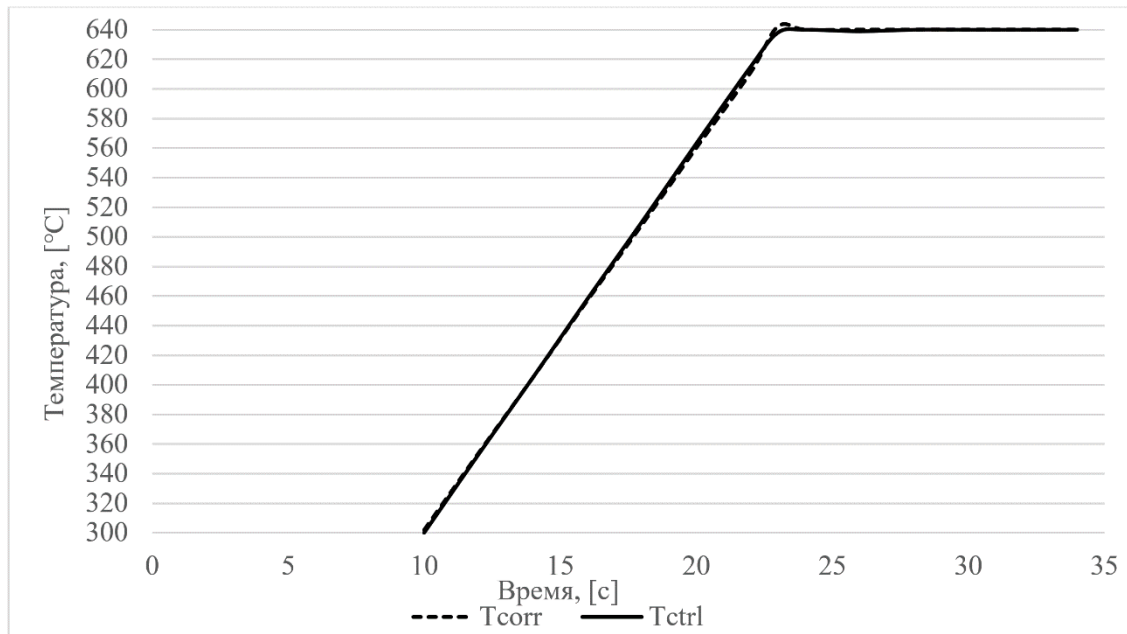


Рис. 8. График процесса управления индукционной пайкой

На рис. 9 изображен график с управлением индукционной пайкой в случае корректировки измерений при помощи ИНС_{корр}.

На рис. 10 изображен график с управлением индукционной пайкой в случае моделирования показаний температуры при помощи ИНС_{прогноз}.

На рис. 11 изображен график с управлением индукционной пайкой на нейросетевой модели (ИНС_{упр}) с моделированием показаний управляющего и корректирующего пирометров при помощи ИНС_{прогноз}.

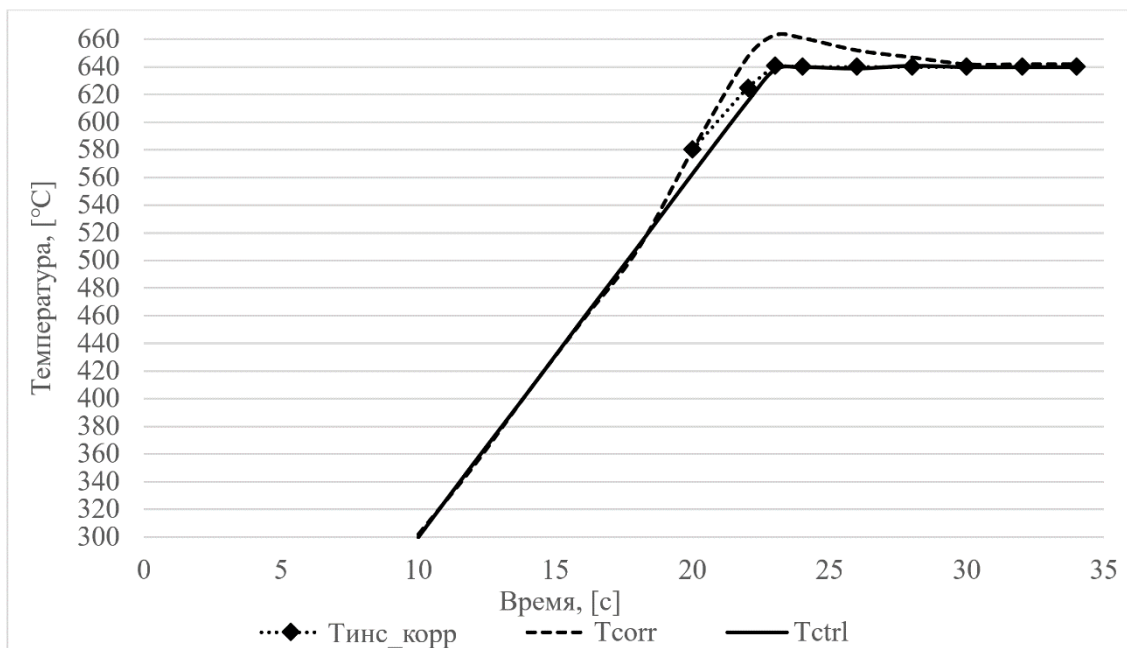


Рис. 9. График процесса интеллектуального управления индукционной пайкой в случае корректировки измерений с одного из пирометров с помощью ИНС_{корр}

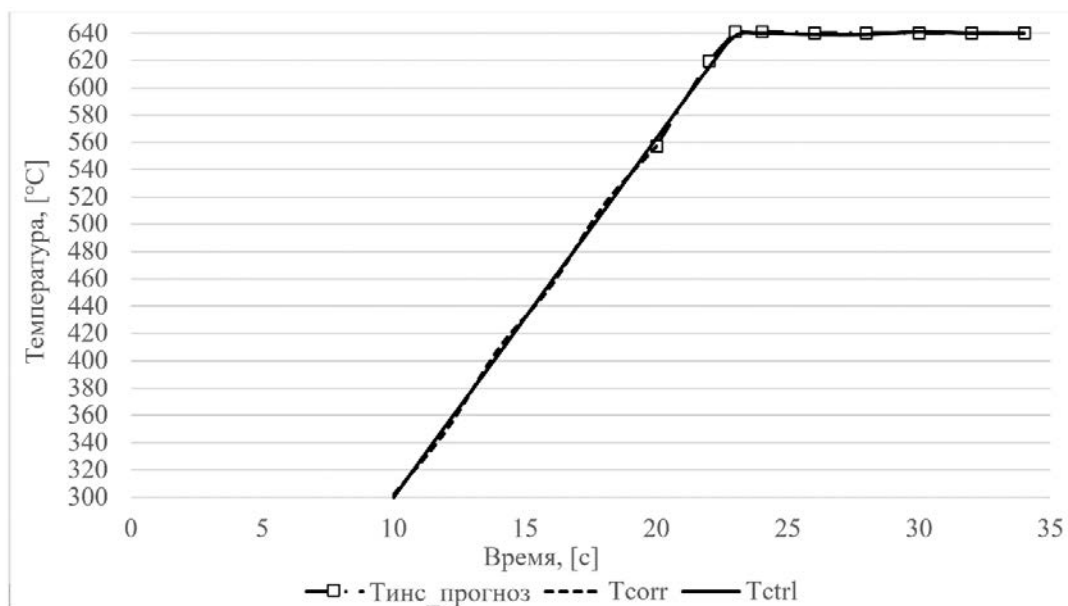


Рис. 10. График процесса интеллектуального управления индукционной пайкой в случае моделирования показания температуры с одного из пирометров с помощью ИНС_{прогноз}

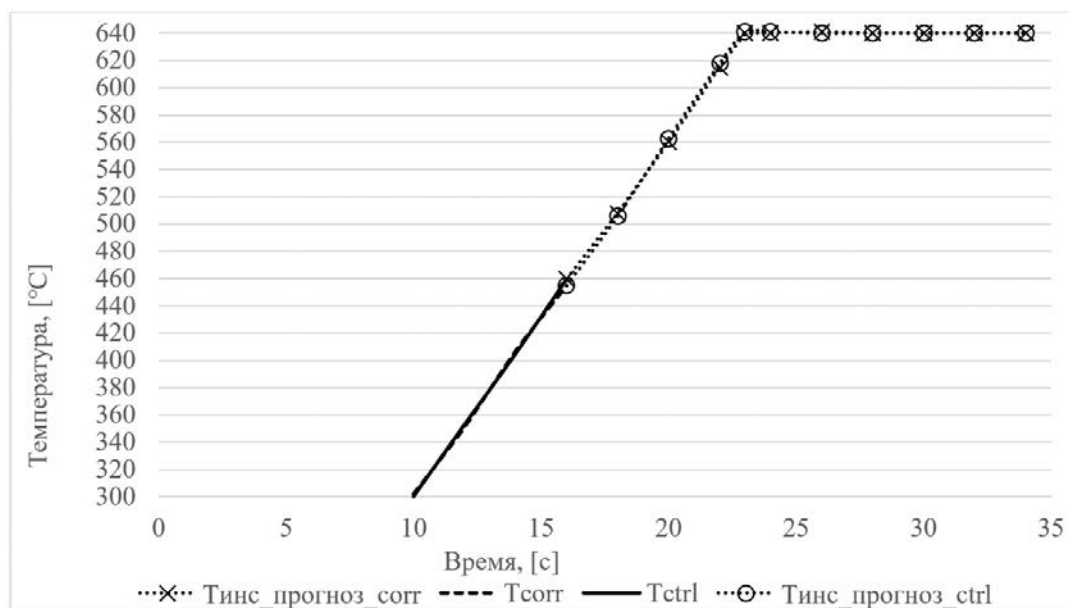


Рис. 11. График процесса интеллектуального управления индукционной пайкой в случае моделирования показаний управляющего и корректирующего пирометров при помощи ИНС_{прогноз} и управления на основе ИНС_{упр}

На рис. 8–11 введены следующие обозначения: Tсог – значения температуры, полученные с корректирующего пирометра; Tctrl – значения температуры, полученные с управляющего пирометра; Тинс_корр – значения температуры, скорректированные с помощью ИНС_{корр}; Тинс_прогноз – показания температуры с пирометра, смоделированные при помощи ИНС_{прогноз}; Тинс_прогноз_сог – смоделированные показания температуры с корректирующего пирометра; Тинс_прогноз_ctrl – смоделированные показания температуры с управляющего пирометра.

По результатам всех экспериментов получены качественные паяные соединения. Как видно из рис. 11, на 19-й секунде управление переключается с классического ПИД-регулятора на ИНС_{упр}. 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.

Выводы

В рамках данной работы представлена разработка интеллектуальной технологии управления индукционной пайкой волноводных трактов космических аппаратов. В работе представлено алгоритмическое и модельное обеспечение такой технологии. Эффективность работы предлагаемых решений проверена в результате экспериментов на прототипе опытного оборудования. Во всех экспериментах получены качественные паяные соединения. Применение представленной в рамках работы интеллектуальной технологии позволит повысить качество управления технологическим процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов и, следовательно, повысить качество производимой на предприятиях ракетно-космической отрасли продукции.

Библиографические ссылки

1. Милов А. В., Тынченко В. С., Мурыгин А. В. Влияние флюса на точность измерений в процессе индукционной пайки алюминиевых волноводных трактов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. № 4 (60). С. 38–46.
2. Адаптивная подсистема автоматического управления производством интеллектуальных электроприводов / Д. В. Шайхутдинов, Н. И. Горбатенко, К. М. Широков, В. В. Гречихин, А. М. Ланкин // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1. С. 103–111.
3. Лютюв А. Г., Рябов Ю. В., Полезин С. А. Повышение качества управления технологическими процессами производства авиационных двигателей // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2017. № 1. С. 149–152.
4. Интеллектуальное управление технологическими системами в условиях цифрового производства / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, М. С. Аносов, А. М. Кузьмишина // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020. № 1 (718). С. 3–12.
5. Кабулова Е. Г. Интеллектуальное управление многостадийными системами металлургического производства // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019. Т. 7, № 1. С. 341–351.
6. Карелина Е. Б., Благовещенская М. М., Клехо Д. Ю. Использование нейросетевого регулятора для управления технологическим процессом бестарного хранения муки // *Технологические процессы, машины и оборудование*. 2017. № 9. С. 38–40.
7. Wang B., Jack H., Lei S., Theodor F. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives // *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. vol. 56. pp. 373-391. doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020.

8. Han H., Zhu S., Qiao J., Guo. M. Data-driven intelligent monitoring system for key variables in wastewater treatment process // *Chinese journal of chemical engineering*. 2018. vol. 26. no. 10. pp. 2093-2101. doi.org/10.1016/j.cjche.2018.03.027.

9. Baidya D., Roy R. Speed control of DC motor using fuzzy-based intelligent model reference adaptive control scheme // *Advances in communication, devices and networking*. Springer, Singapore, 2018. pp. 729-735. doi.org/10.1007/978-981-10-7901-6_79.

10. Vassilyev S. N., Kelina A. Yu., Kudinov Y. I., Pashchenko F. F. Intelligent control systems // *Procedia Computer Science*. 2017. vol. 103. pp. 623-628. doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.088.

11. Милов А. В., Тынченко В. С., Мурыгин А. В. Программное обеспечение идентификации и коррекции ненормативных погрешностей средств измерений в процессе индукционной пайки // *Программные продукты и системы*. 2020. Т. 33, № 3. С. 502–509.

References

1. Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V. [Effect of flux on the accuracy of measurements during induction brazing of aluminum waveguide paths]. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 4 (60), pp. 38-46 (in Russ.).
2. Shajhutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Shirokov K.M., Grechihin V.V., Lankin A.M. [Adaptive subsystem of automatic production control of intelligent electric drives]. *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1, pp. 103-111 (in Russ.).
3. Ljutov A.G., Rjabov Ju.V., Polezin S.A. [Improving the quality of process control in the production of aircraft engines]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Aeronautical Engineering*, 2017, no. 1, pp. 149-152 (in Russ.).
4. Kabaldin Ju.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuz'mishina A.M. [Intelligent control of technological systems in digital production]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering*, 2020, no. 1 (718), pp. 3-12 (in Russ.).
5. Kabulova E.G. [Intelligent control of multistage systems of metallurgical production]. *Modeling, optimization and information technology*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 341-351 (in Russ.).
6. Karelina E.B., Blagoveshenskaja M.M., Kleho D.Ju. [Using a neural network controller to control the technological process of bulk flour storage]. *Technological processes, machines and equipment*, 2017, no. 9, pp. 38-40 (in Russ.).
7. Wang B., Jack H., Lei S., Theodor F. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. In *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. vol. 56. pp. 373-391. doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020.
8. Han H., Zhu S., Qiao J., Guo. M. Data-driven intelligent monitoring system for key variables in wastewater treatment process. In *Chinese journal of chemical*

engineering. 2018. Vol. 26, no. 10, pp. 2093-2101. doi.org/10.1016/j.cjche.2018.03.027.

9. Baidya D., Roy R. Speed control of DC motor using fuzzy-based intelligent model reference adaptive control scheme. In *Advances in communication, devices and networking*. Springer, Singapore, 2018. Pp. 729-735. doi.org/10.1007/978-981-10-7901-6_79.

10. Vassilyev S.N., Kelina A.Yu., Kudinov Y.I., Pashchenko F. F. Intelligent control systems. In *Proce-*

dia Computer Science. 2017. vol. 103. Pp. 623-628. doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.088.

11. Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V. [Software for identification and correction of non-normative errors of measuring instruments during induction brazing]. *Software products and systems*, 2020, vol. 33, no. 3, pp. 502-509 (in Russ.).

Application of Artificial Neural Network Group to Control Induction Soldering of Spacecraft Waveguides

A. V. Milov, Post-graduate, Siberian State University of Science and Technology named after M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

V. S. Tynchenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Siberian State University of Science and Technology named after M. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

S. O. Kurashkin, Post-graduate, Siberian State University of Science and Technology named after M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

The paper deals with the development of the intelligent technology for solving the problem of controlling the process of induction soldering of spacecraft waveguides. The solution of this problem is complicated by peculiarities, caused by the use of non-contact temperature sensors. Intelligent methods have proved themselves well in solving control tasks in conditions of uncertainty. Use of intelligent methods is well suitable both for solving problems of identification and correction of errors of measuring instruments, and for direct control of the technological process of induction soldering of spacecraft waveguides. The essence of the proposed technology consists in the application of artificial neural networks to solve the problem of controlling the induction soldering process at the following stages: assessing the quality of temperature measurements in the heating zone, obtained by pyrometric sensors, correction of measurements in case of detection of non-standard errors in measuring instruments; control of induction heating process in the absence of reliable readings of measuring instruments. The paper describes the structures of artificial neural networks that are proposed to solve the control tasks, a block diagram of the intelligent control algorithm, as well as the results of experimental studies of the effectiveness of the proposed approach. The use of the presented intelligent technology will improve the quality of control of the process of induction soldering of spacecraft waveguides.

Keywords: induction soldering, waveguides, intelligent technology, artificial neural networks, control.

Получено: 17.02.2021