

*Д.Д. Быстров, Н.Г. Филиппенко, Р.А. Манданов, А.Р. Ибрагимов, С.А. Колосов*

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

**Аннотация:** *Одной из основных задач производства металлических изделий является нагрев металла до определенной температуры. Для этого используются различные способы нагрева металлов, включая индукционный нагрев. В данной статье авторами рассматривается процесс автоматизации установки индукционного нагрева цветных металлов.*

*Автоматизация процесса нагрева металлов является важным этапом технологического процесса, который позволяет достичь повышения точности за счет объективного контроля производственно-технологического процесса. В работе показана автоматизация процесса индукционного нагрева металлов, с возможностью использования регуляторов мощности генерирующих устройств по заранее описанным алгоритмическим решениям и соответствующим программным обеспечением.*

*Для обеспечения точности и контроля процесса нагрева металлов был обоснован и выбран контролируемый параметр динамики изменения температур изделия. Выбранные датчики и схемы подключения позволяют контролировать температуру нагрева металла в режиме реального времени и регулировать процесс нагрева мощностью генерации токов высокой частоты с целью достижения оптимальных результатов. Представлены рекомендации по использованию автоматизированных систем управления процессом нагрева металлов для практического использования.*

**Ключевые слова:** *автоматизация, индукционный нагрев, цветные металлы, генераторы, программное обеспечение, датчики температуры.*

*D.D. Bystrov, N.G. Filippenko, R.A. Mandanov, A.R. Ibragimov, S.A. Kolosov*

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **AUTOMATION OF INDUCTION HEATING OF NON-FERROUS METALS**

**Abstract.** *This article discusses the technology of automation of induction heating of non-ferrous metals. One of the main tasks of the production of metal products is to heat the metal to a certain temperature. To do this, various methods of heating metals are used, including induction heating.*

*Automation of the metal heating process is an important stage of the technological process, which allows achieving high accuracy and controllability of the production process. There are several ways to automate the metal heating process, including the use of special generators and software.*

*To ensure the accuracy and control of the metal heating process, it is also recommended to use special temperature sensors. These sensors allow you to monitor the heating temperature of the metal in real time and adjust the heating process to achieve optimal results.*

*The article also provides recommendations on the use of automated control systems for the heating of metals.*

**Keywords:** *automation, induction heating, non-ferrous metals, generators, software, temperature sensors.*

### **Введение**

В настоящее время автоматизация производственных процессов является одним из основных направлений развития промышленности. В процессе производства металлических изделий широко используется технология индукционного нагрева цветных металлов. Однако, несмотря на высокую эффективность данной технологии, ее процесс автоматизации все еще не развит в достаточной степени [1]. В данной статье рассматривается вопрос автоматизации установки индукционного нагрева цветных металлов с помощью термодатчиков. Цель данной работы заключается в проведении анализа существующего оборудования и технологий нагрева металлов, а также определении возможности модернизации систем автоматизированного управления с целью совершенствования технологии нагрева металлов. Данная тема работы весьма актуальна, т.к. брак готовых изделий, на примере ТВЧ-пайки трубопроводов, достигает 15%. Результаты работы могут

быть использованы на производственных предприятиях, использующих технологию индукционного нагрева в своей деятельности.

### Обзор технологии индукционного нагрева

Индукционный нагрев цветных металлов – это процесс нагрева металлических изделий путем воздействия на них переменного магнитного поля высокой частоты. Основным преимуществом этой технологии является возможность получения равномерного нагрева металла без применения открытого огня или нагревательных элементов [2]. Индукционный нагрев применяется в различных отраслях промышленности, таких как металлургия, машиностроение, электроника и другие.

Процесс индукционного нагрева основан на принципе электромагнитной индукции, когда переменное магнитное поле высокой частоты наводит электрический ток в металле, что приводит к его нагреву. Основным элементом установки индукционного нагрева является индукционный нагревательный катушка, которая создает переменное магнитное поле высокой частоты [3].

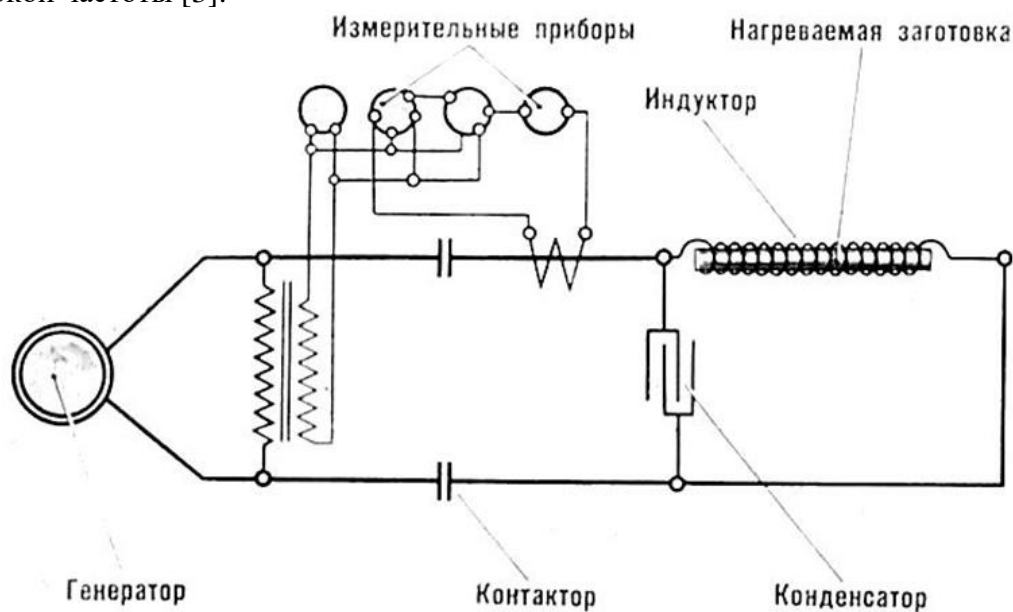


Рис. 1. Принципиальная схема установки индукционного нагрева

Технология индукционного (ТВЧ) нагрева широко применяется в машиностроении с целью термического воздействия на металлические изделия различной конфигурации. В зависимости от требуемой температуры нагрева и размеров изделия, выбирается соответствующая индукционная нагревательная катушка [4].

Достоинства индукционного нагрева металлов:

- высокая скорость нагрева металла;
- равномерный нагрев металла без перегрева;
- высокая эффективность и экономичность;
- отсутствие открытого огня и нагревательных элементов;
- возможность нагрева металла в определенных зонах, что позволяет избежать ненужного нагрева всего изделия.

Недостатки индукционного нагрева металлов:

- высокая стоимость оборудования;
- необходимость проведения подготовительных работ для установки оборудования;
- ограниченность в выборе материалов для нагрева;
- невозможность проведения процесса нагрева в открытом пространстве;
- необходимость контроля температуры нагрева металла, чтобы избежать его перегрева и повреждения.

С целью снижения недостатков и для более эффективной и безопасной работы установок индукционного нагрева цветных металлов, необходимо проводить их автоматизацию [5]. Концепция процесса автоматизации существующих устройств направлена на то, чтобы в качестве аппаратных устройств должны быть использованы бюджетные модели различных датчиков [6]. При этом необходимо учесть, что ТВЧ может оказывать влияние на датчики, находящиеся в активной зоне. Таким образом, выбор аппаратных устройств, алгоритма их работы и конструкционного решения по их размещению требует детального подхода в каждом конкретном случае [7]. Автоматизация систем управления позволит контролировать процесс нагрева, что сведет к минимуму процент брака из-за перегрева металлических изделий. Совершенствование системы автоматизированного управления позволит модернизировать существующие технологические процессы нагрева металлов, повысит эффективность, надежность работы установок и обеспечит комфортные условия эксплуатации оборудования [8].

Исследования показали, что для успешной реализации процесса индукционного нагрева цветных металлов необходимо учитывать ряд их электрофизических особенностей (немагнитные свойства). При этом, важно правильно выбрать тип и мощность генератора переменного тока, а также подобрать оптимальные параметры нагрева для каждого конкретного типа металла [9]. Кроме того, при работе с цветными металлами следует учитывать их теплопроводность, магнитную и термическую чувствительность, чтобы избежать их интенсивного нагрева или нагрева охлаждения. Учитывая быстротечность процесса ТВЧ-обработки, было определено, что основным недостатком оборудования индукционного нагрева является низкий уровень автоматизации контроля динамики (скорости) термического нагрева [10]. Бытующее мнение о невозможности достоверного контроля температуры в зоне ТВЧ-воздействия превращено в догму подтверждаемую отсутствием на промышленном электротермическом оборудовании систем АСУ процессом нагрева.

В связи с этим в ходе работы авторами была выдвинута гипотеза о возможности разработки системы автоматизированного управления процессом индукционного нагрева металлов, основанное на ранее проведенных исследованиях авторов [11-14].

### **Автоматизация установки индукционного нагрева металлов**

Анализ литературных источников по способам управления процессом ТВЧ-нагрева и анализ устройства, как объектов управления, позволил сделать заключение, что наиболее информативным контролируемым параметром данного вида нагрева является температура.

Автоматизация установки индукционного нагрева с помощью контроля температуры (термодатчиками) и воздействия на выходную мощность (изменением напряжения или сменой частоты ТВЧ) установки, является эффективным методом улучшения производительности и качества продукции. Для этого необходимо интегрировать разрабатываемую автоматизированную систему управления (АСУ), которая будет контролировать процесс нагрева и регулировать мощность установки в зависимости от температуры металла без внесения значительных изменений в существующие схемы управления и устройства. С этой целью были выбраны аппаратные элементы системы блока управления и разработан алгоритм АСУ процесса ТВЧ-нагрева.

В качестве датчиков температуры металла были выбраны термодатчики (термопара, терморезистор), которые могут встраиваться в технологические устройства установки. Встраивание термодатчика, например, в корпус тигля (в случае расплава) обеспечит эффективное его экранирование от воздействия высоких частот. Таким образом неискаженная передача информации о температуре в АСУ, после обработки и анализа ее значений (скорости изменения) позволит автоматически регулировать мощность установки. При этом схема регулирования мощностью будет зависеть от технологического процесса и заключаться в следующем:

- поддержание заданной температуры в определенных пределах, что необходимо при технологических процессах термической обработки;
- достижение заданной температуры (рекристаллизации) и не превышение или не понижение ее, что востребовано при процессах холодной или горячей штамповки, соответственно;
- достижение температуры расплава за минимальное время нагрева с учетом фазовых превращений, в момент которых требуется увеличение мощности ТВЧ-нагрева.

С этой целью разрабатываемая АСУ ТВЧ-нагрева позволит изменять мощность установки для управления. В качестве устройств управления мощностью, как бюджетный вариант, может использоваться тиристорное управление с принципом управления широтно-импульсным модулированием сигнала или диммированием. Например, в начале нагрева мощность установки будет устанавливаться высокой, а по мере достижения заданной температуры мощность будет автоматически снижаться, чтобы избежать перегрева металла или мощность будет автоматически повышаться, чтобы добиться более быстрого расплава металла.

Также немаловажно, что значительный процент брака ТВЧ-электротермии, в связи с его быстротечностью, зависит от скачков напряжения от одномоментного запуска энергопотребляемых устройств и влияния случайной этиологии металлических деталей и узлов, не входящих в технологическую систему ТВЧ-устройства.

В результате внедрения автоматизированной системы управления установкой индукционного нагрева, можно достичь более высокой точности и скорости нагрева, а также уменьшить количество брака продукции. Кроме того, автоматизация установки индукционного нагрева позволит снизить трудозатраты и увеличить производительность производственного процесса.

Необходимо заметить, что работам по автоматизации установки индукционного нагрева предшествовали мероприятия по изучению ее конструкции, схем и принципа работы (рис. 2).

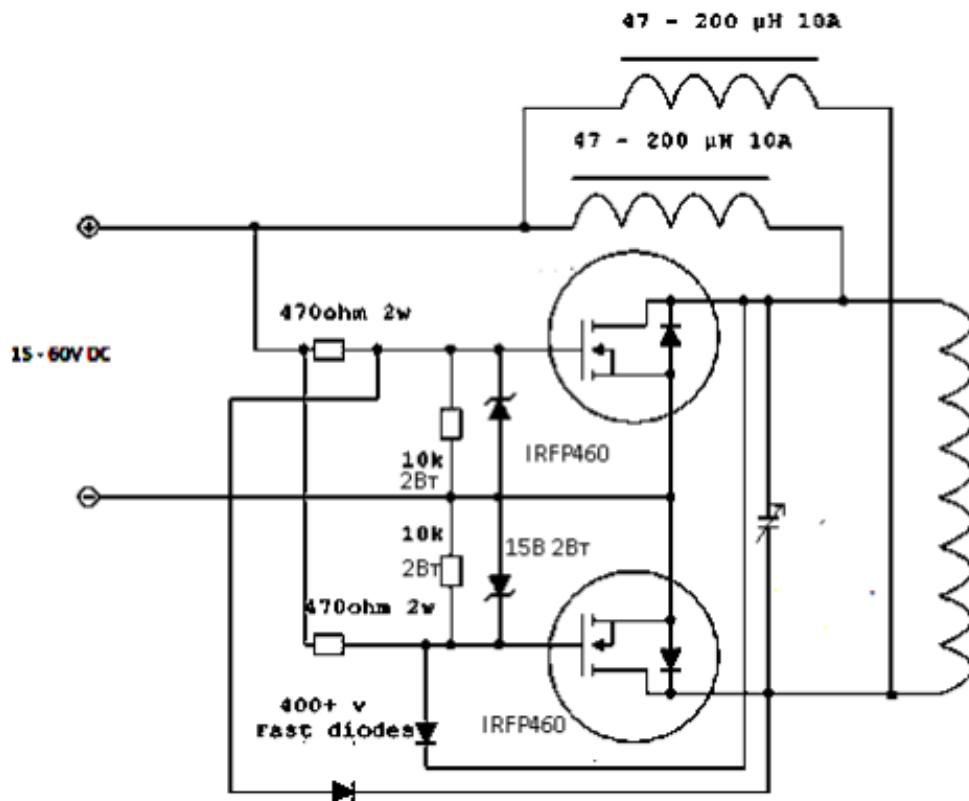


Рис. 2. Схема установки индукционного нагрева, выбранная в качестве экспериментальной для проведения работ по автоматизации системы управления

Поэтому проведенный анализ существующей схемы установки, позволил выявить ее простоту, доступность воспроизводства и открытость ее схемы к возможности внедрения в нее систем автоматизации.

Необходимо отметить, что данный вид исследований необходимо проводить при выборе других типов устройств и объектов управления. Также это относится и к комплексу контролируемых параметров и типов датчиков, необходимых для построения системы автоматизированного управления процессом нагрева ТВЧ.

Особо хотелось бы обратить внимание на необходимость проведения предварительного ревизирования генерирующих ТВЧ устройств, с целью проверки их работоспособности в штатном (паспортном) режиме.

Анализ конструкции установки индукционного нагрева, как объекта управления, подтверждает возможность автоматизации процесса. Для этого разрабатывается блок-схема управления существующего оборудования, которая будет контролировать процесс нагрева и регулировать мощность установки в зависимости от температуры металла.

Разработанный алгоритм управления (рис. 3) позволил перейти к построению блок-схемы системы управления ТВЧ-нагревом с удовлетворительной точностью ( $\pm 3^\circ \text{C}$ ), схема которого в настоящей работе не показана.

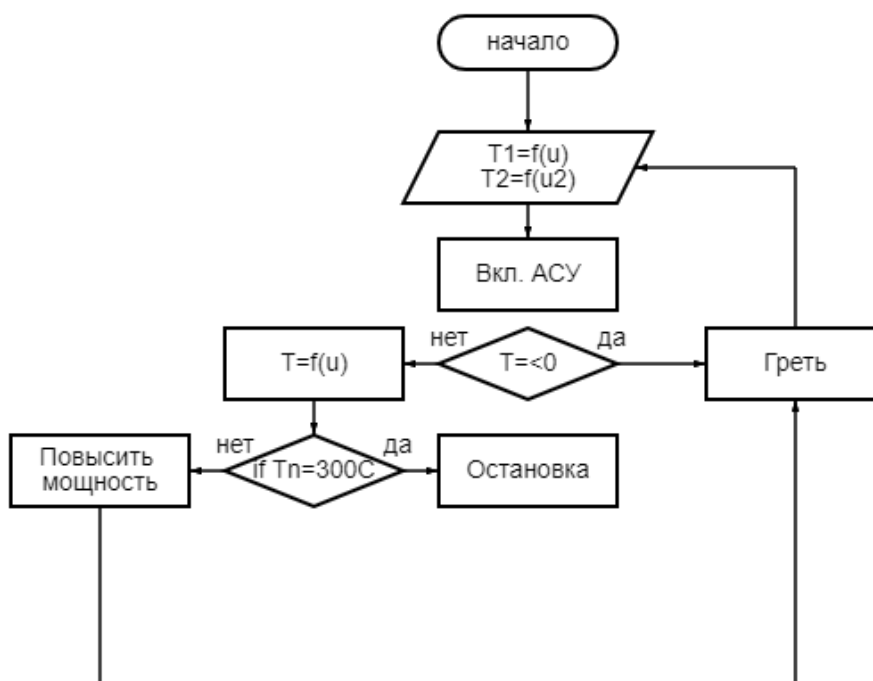


Рис. 3. Блок-схема автоматизированной системы управления процессом ТВЧ-нагревом

Таким образом, разработанная система позволяет автоматически регулировать мощность установки, с целью поддержания предусмотренных режимов нагрева металла и обеспечить технологическую дисциплину процесса ТВЧ-обработки.

Внедрения автоматизированной системы управления установкой индукционного нагрева расширит возможности технологий ТВЧ-нагрева при процессах термообработки, штамповки, пайки и плавлении.

### Заключение

В процессе работы были определены принципы работы установки индукционного нагрева и выбраны основные контролируемые параметры, необходимые для автоматизации процесса нагрева.

Разработан алгоритм системы управления ТВЧ-нагревом.

Выбраны аппаратные устройства блока контроля и управления системы автоматизированного управления процессом ТВЧ-нагревом.

Даны рекомендации использования автоматизированной системы управления установкой индукционного нагрева для технологий ТВЧ-нагрева процессов термообработки, штамповки, пайки и плавления.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Некрасова В.Н. Технология термического производства. Способы наноструктурирования материалов: учеб. пособие / В.Н. Некрасова, М.Ю. Симонов. Т.В. Некрасова. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. - 248 с.
2. Оборудование металлургического производства : учеб. пособие / Н. В. Васюнина, Т. Р. Гильманшина, Э. А. Рудницкий [и др.]. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021. - 264 с.
3. Суворин, А. В. Электротехнологические установки : учеб. пособие / А.В. Суворин. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т. 2011. - 376 с..
4. Чернышов Е.А., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А. Современные плавильные печи. Устройство и работа плавильных печей литейных цехов : учебное пособие / под общ. ред. Е. А. Чернышова. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. - Ч. 2. - 453 с.
5. Лаврентьева М.В., Божеева Т.В., Говорков А.С. Автоматизация проектно - конструкторских работ и технологических процессов : учеб. пособие : в 2 ч. - Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2021. - Оборудование, ч. II. - 176 с.
6. Электрооборудование для электротехнологических установок: учебное пособие / сост.: А. Е. Немировский, И. Ю. Сергиевская, О. И. Степанов ; М-во образ. и науки РФ. Вологод. гос. ун-т. - Вологда : ВоГУ, 2017. - 75 с.
7. Смирнов Ю. А. Технические средства автоматизации и управления : учебное пособие для вузов / Ю. А. Смирнов. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2021. - 456 с.
8. Сысоев С. К. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов : учебное пособие для вузов / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. - 3-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 352 с.
9. Буров В.Г. Влияние жидкой фазы на формирование структуры и механических свойств переходных слоев в гетерофазных металлических материалах: монография / В.Г. Буров. В.А. Батаев. А.А. Никулина. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. - 232 с.
10. Электротехническое оборудование и схемы соединений подстанций 6-330 кВ : учебное пособие / М-во образования и науки Арханг. обл., ФГАОУВО «Сев. (Аркт.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова» ; сост. И. И. Соловьев, С. В. Петухов, М. А. Хвиюзов. - 2-е изд. - Архангельск : КИРА, 2022. - 159 с.
11. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Ларченко А.Г., Филатова С.Н. Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, А.Г. Ларченко, С.Н. Филатова Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 55-65.
12. Лившиц А.В., Машович А.Я., Филиппенко Н.Г. Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты / А.В. Лившиц, А.Я. Машович, Н.Г. Филиппенко Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2 (30). С. 135-140.
13. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В., Попов М.С., Гозбенко В.Е. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве / Н.Г.Филиппенко, Д.В. Буторин, А.В.Лившиц, М.С. Попов, В.Е. Гозбенко Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 96-103.
14. Буторин Д.В., Филатова С.Н., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при электротермической обработке Д.В. Буторин, С.Н. Филатова, А.В. Лившиц, С.К. Каргапольцев Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 117-125.

## REFERENCES

1. Nekrasova, V.N. Tehnologiya termicheskogo proizvodstva. Sposobi nanostrukturirovaniya materialov [Technology of thermal production. Methods of nanostructuring materials]: studies. manual / V.N. Nekrasova, M.Y. Simonov. T.V. Nekrasova. - Perm: Publishing House of Perm State Technical University. un-ta, 2011. - 248 p.
2. Oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva [Equipment of metallurgical production] : studies. manual / N. V. Vasyunina, T. R. Gilmanshina, E. A. Rudnitsky [et al.]. -Krasnoyarsk : Sib. feder. un-t, 2021. - 264 p.
3. Suvorin, A.V. Elektrotehnologicheskie ustanovki [Electrotechnological installations] : textbook. manual / A.V. Suvorin. - Krasnoyarsk : Sib. feder. un-t. 2011. - 376 p..
4. Chernyshov E.A., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A. Sovremennye plavilnye pechi. Ustroystvo i rabota plavilnykh pechei liteinykh tselov [Modern melting furnaces. The device and operation of melting furnaces of foundries] : a textbook / under the general ed. of E. A. Chernyshov. - Komsomolsk-on-Amur: KnAGU, 2018. - Part 2. - 453 p.
5. Lavrentieva M.V., Bozheeva T.V., Govorkov A.S. Avtomatizatsiya proektno \_konstruktorskiykh rabot i tehnologicheskikh processov [Automation of design works and technological processes] : textbook. manual : in 2 hours - Irkutsk : Publishing house of IRNTU, 2021. - Equipment, part II. - 176 p.
6. Elektrooborudovanie dlya elektrotehnologicheskikh ustanovok [Electrical equipment for electrotechnological installations]: textbook / comp.: A. E. Nemirovsky, I. Y. Sergievskaya, O. I. Stepanov; M-vo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii. Vologda State University. - Vologda : VSU, 2017. - 75 p.
7. Smirnov Yu. A. Tehnicheskiye sredstva avtomatizatsii i upravleniya [Technical means of automation and control] : a textbook for universities / Yu. A. Smirnov. - 4th ed., revised. - St. Petersburg : Lan, 2021. - 456 p.
8. Sysoev S. K. Tehnologiya mashinostroeniya. Proektirovaniye tehnologicheskikh processov [Technology of mechanical engineering. Designing technological processes] : a textbook for universities / S. K. Sysoev, A. S. Sysoev, V. A. Levko. - 3rd ed., ster. - St. Petersburg: Lan, 2022. - 352 p.
9. Burov V.G. Vliyaniye zhidkoy fazy na formirovaniye struktury i mekhanicheskikh svoystv perekhodnykh sloev v geterofaznykh metallicheskikh materialakh [The influence of the liquid phase on the formation of the structure and mechanical properties of transition layers in heterophase metallic materials]: monograph / V.G. Burov. V.A. Bataev. A.A. Nikulina. - Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2019. - 232 p.
10. Elektrotehnicheskoye oborudovaniye i shemi soedineniy podstanciy 6-330 kV [Electrical equipment and wiring diagrams of substations 6-330 kV] : textbook / Ministry of Education and Science of the Arkhangel'sk region, FGAOUVO "Sev. (Arct.) feder. M. V. Lomonosov University"; comp. I. I. Solovyov, S. V. Petukhov, M. A. Khviyuzov. - 2nd ed. - Arkhangel'sk: KIRA, 2022. - 159 p.
11. Livshits A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. Vysokochastotnaya elektrotermicheskaya obrabotka nemetallicheskogo vtorychnogo syr'ya [High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials] / A.V. Livshits, N.G. Filippenko, A.G. Larchenko, S.N. Filatova Science and education: scientific edition of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman. 2014. No. 6. pp. 55-65.
12. Livshits A.V., Mashovich A.Ya., Filippenko N.G. Aspekty elektrotermicheskoy obrabotki materialov elektromagnitnym polem vysokoy chastoty [Aspects of electrothermal treatment of materials by high frequency electromagnetic field] / A.V. Livshits, A.Ya. Mashovich, N.G. Filippenko Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. No. 2 (30). pp. 135-140.
13. Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V., Popov M.S., Gozbenko V.E. Avtomatizatsiya izmereniya temperatury polimernogo materiala pri vysokochastotnom elektrotermicheskom nagreve [Automation of measuring the temperature of polymeric material during high-frequency electrothermal heating] / N.G. Filippenko, D.V. Butorin, A.V. Livshits, M.S.

Popov, V.E. Gozbenko Modern technologies. System analysis. Modeling. 2017. No. 1 (53). pp. 96-103.

14. Butorin D.V., Filatova S.N., Livshits A.V., Kargapoltsev S.K. Avtomatizatsiya kontrolya strukturnykh prevrashcheniy v polimernykh materialakh pri elektrotermicheskoy obrabotke [Automation of control of structural transformations in polymeric materials during electrothermal processing] D.V. Butorin, S.N. Filatova, A.V. Livshits, S.K. Kargapoltsev Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No. 1 (49). pp. 117-125.

#### **Информация об авторах**

**Быстров Даниил Дмитриевич** – студент, кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, email: mrbystrov8989@gmail.com

**Филиппенко Николай Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, email: ifpi@mail.ru

**Манданов Родион Александрович** – студент, кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, email: rodionmandanov086@gmail.com

**Ибрагимов Александр Рамильевич** – студент, кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, email: 201986181@irgups.ru

**Колосов Семён Алексеевич** – студент, кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, email: semion.kolosoff@yandex.ru.

#### **Information about the authors**

**Bystrov Daniil Dmitrievich** – student, Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, email: mrbystrov8989@gmail.com

**Filippenko Nikolay Grigorievich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Automation of production processes», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, email: ifpi@mail.ru

**Mandanov Rodion Aleksandrovich** – student, department «Automation of production processes», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, email: rodionmandanov086@gmail.com

**Ibragimov Alexander Ramilievich** Student, Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, email: 201986181@irgups.ru

**Kolosov Semyon Alekseevich** student, Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, email: semion.kolosoff@yandex.ru.