



*А. Г. Ларченко, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц*

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

*Дата поступления: 7 декабря 2018 г.*

## **ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

**Аннотация.** В данной научной работе рассматривается процесс повышения качества изделий из полимерных материалов путем воздействия высокочастотного излучения на объект контроля и выявления дефектов различного рода и характера в автоматизированном режиме. Авторы статьи приводят номенклатуру изделий из полимерных композиционных материалов, применяемых в подвижном составе нового поколения, затрагивают вопрос неразрушающего контроля и улучшения эксплуатационных свойств деталей в современном производственном процессе, обосновывают выбор метода высокочастотного диагностирования как наиболее подходящего для повышения качества при изготовлении полимерных изделий и в ходе ремонтных работ. В представленной статье описывается разработка автоматизированной системы управления процессом высокочастотного контроля в промышленных масштабах. Исследование и разработка системы автоматизации производятся на базе устройства диагностирования тока высокой частоты, которое было создано и запатентовано авторами в рамках данного исследования проекта. Приводится методика определения входных параметров диагностирования. Также в работе представлены блок-схемы алгоритма управления процессом контроля при выполнении подготовительных операций и непосредственно при выявлении дефектов типа «воздушное включение», «содержание влаги», «металлическое включение». Описывается режим акклиматизации, разъясняется работа блоков режима контроля фазового состояния и режима контроля динамики возникновения частичных разрядов, затрагивается вопрос о восстановлении эксплуатационных свойств изделий и повышении их качества в автоматизированном режиме после окончания процесса диагностики. Авторы представляют последовательность работы блока обработки информации, описывают завершение работы системы управления, приводят выводы.

**Ключевые слова:** повышение качества, неразрушающий контроль, полимерные изделия, диагностирование изделий, система управления, технологическое обеспечение, автоматизация, дефекты.

*A. G. Larchenko, N. G. Filippenko, A. V. Livshits*

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation*

*Received: December 7, 2018*

## **HIGH-FREQUENCY ELECTROTHERMAL AUTOMATED TECHNOLOGY OF IMPROVING THE QUALITY OF POLYMERIC PRODUCTS OF COMPLEX CONFIGURATION**

**Abstract.** This scientific paper considers the process of improving the quality of products made of polymeric materials by means of the effect of high-frequency radiation on the object of control and the detection of defects of various kinds and nature in an automated mode. The authors of the article present the range of products made of polymer composite materials used in the new-generation rolling stock, address the issue of non-destructive testing and improving the performance properties of parts in the modern production process, and give the grounds for choosing the high-frequency diagnostic method as the most suitable for improving quality manufacturing and during repair work. This article describes the development of an automated process control system for high-frequency control on an industrial scale. Research and development of the automation system is carried out on the basis of a device for diagnosing high-frequency currents, which was developed and patented by the authors as part of this study. The article provides a method for determining the input diagnostic parameters. Also, the work presents flowcharts of the control process monitoring algorithm when performing preparatory operations and directly when detecting defects such as "air inclusion", "moisture content", "metal inclusion". The acclimatization mode is described. The operation of the blocks of the phase state control mode and the mode of control of the dynamics of the inception of partial discharges is explained. The article touches upon the problem of restoring the operational properties of products and improving quality in an automated mode on completing of the diagnostic process. The authors present the sequence of operation of the information processing unit, describe the completion of the management system shutdown, and provide conclusions.

**Keywords:** quality improvement, non-destructive testing, polymer products, diagnosing products, control system, technological support, automation, defects.

### **Введение**

На сегодняшний день все больше узлов и деталей подвижного состава нового поколения изготавливаются из полимерных композиционных материалов. Кроме полиамидного сепаратора в вагонном хозяйстве активно используются втулки

подвески тормозного башмака боковой рамы, демпферы скользуна тележки, упруго-катковые скользуны-демпферы, износостойкие вставки адаптера кассетной буксы, накладки фрикционного клина [1–3]. Гарантийный срок эксплуатации указанных деталей достигает 500 тыс. км пробега



вагона. Несмотря на такие серьезные заявленные гарантии данные детали зачастую выходят из строя значительно раньше – при пробеге 50–70 тыс. км. Следует отметить, что на предприятиях вагоноремонтного профиля входной, операционный и приемочный контроль перечисленных полимерных изделий осуществляется только визуальным методом, который не позволяет выявить такие скрытые структурные дефекты, как трещины, поры, металлические включения, что в свою очередь приводит к значительным экономическим потерям, непредвиденному расходу запасных частей, снижению качества выпускаемой продукции. Кроме этого, в большинстве случаев неразрушающий контроль объектов производства – последняя и единственно возможная технологическая операция, позволяющая предотвратить возникновение непредвиденных аварийных ситуаций. Проведенный анализ теоретических и экспериментальных исследований [4–7] подтвердил, что наиболее подходящим методом диагностирования полимерных изделий с точки зрения информативности, быстроты, безопасности и энергоэффективности является использование высокочастотного метода контроля. Данный метод основан на выявлении локальных дефектов различного происхождения преимущественно в изделиях из полимерных, композиционных материалов путем воздействия на исследуемый объект внешнего электрического поля. Тем не менее, несмотря на внушительную практическую значимость высокочастотный метод диагностирования на сегодняшний день не автоматизирован, в результате чего возникают определенные сложности при проведении контроля в условиях массового производства [4, 8]. Исходя из изложенного целью настоящего исследования является: создание автоматизированной системы управления процессом диагностирования токами высокой частоты на базе созданного разработанного и запатентованного устройства контроля изделий различной конфигурации из полимерных материалов. Общие технические характеристики данного устройства, принцип работы и комплектация уже были представлены в ранее опубликованных исследованиях [9–10].

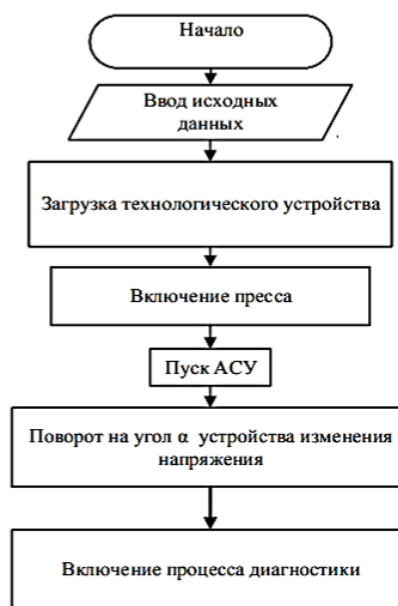
#### **Автоматизированная система управления процессом диагностирования и повышения качества изделий из полимерных материалов**

Для организации работы автоматизированной системы управления процессом диагностирования первоначально следует определить основные входные параметры контроля: подобрать и установить рабочее напряжение в зависимости от геометрических размеров изделия и рассчитать

потребляемую энергию. Для решения данных подзадач в рамках исследования был создан и зарегистрирован программный комплекс «Aleo-Diagnost» [7].

После определения входных параметров необходимо произвести расчет угла поворота устройства изменения напряжения  $\alpha$  с помощью дополнительно разработанного авторами модуля «Расчет угла поворота переменного конденсатора в зависимости от напряжения».

Разработанная в ходе исследования блок-схема алгоритма управления процессом диагностирования для удобства просмотра в данной научной работе разбита на части. Подготовительные операции представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления процессом диагностики (подготовительный процесс)**

Непосредственная работа системы управления диагностированием осуществляется в определенном порядке. В блоки вычисления вводят основные данные изделия и рассчитанные входные параметры контроля. Устанавливают изделие в пространство между двумя электродами (в зависимости от конфигурации объекта контроля также возможна установка дополнительного технологического оснащения).

Прижимная плита (верхний электрод) направляется к изделию до момента создания надежного электрического контакта. Для безопасности процесса необходимо закрыть защитный экран, включить пресс. Нажатием кнопки «Пуск» непосредственно запускается система автоматизации. После запуска системы управления исполнительный механизм устройства обеспечивает

расчетное рабочее напряжение. Затем в автоматизированном режиме включается процесс контроля.

Особенно важно в момент диагностирования учитывать режим акклиматизации полимерного изделия для исключения неверных результатов вследствие индукционных процессов устройства контроля. Блок акклиматизации представлен на рис. 2. Данный блок согласно конструкционным особенностям оборудования и в зависимости от марки материала рассчитывает значение времени акклиматизации  $\tau_{акк}$ , необходимого для завершения переходных процессов в электрической цепи рабочего конденсатора (в случаях выгорания инородных включений на поверхности изделия, в пространстве электродов) [6, 10].

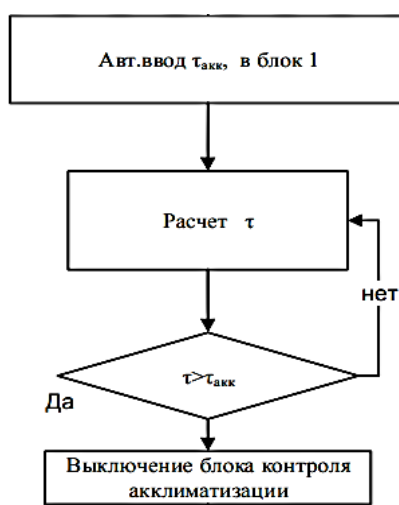


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления процессом диагностики (процесс акклиматизации)

По завершении периода акклиматизации происходит отключение блока и одновременный запуск процесса контроля дефектов типа «воздушное включение», «содержание влаги», «металлическое включение».

При запуске процесса регистрации выходных параметров, необходимо учитывать значения анодного тока  $I_a$  с целью аварийного выключения при достижении показаний первого критического значения. При превышении интенсивности возникновения частичных разрядов выше предельного значения также важно организовать незамедлительное отключение оборудования. С этой целью авторами были созданы блоки аварийного отключения – блок режима контроля фазового состояния и блок режима контроля динамики возникновения частичных разрядов.

В блоке контроля фазового состояния выполняется алгоритм определения первого максимума в графике усредненных значений анодного тока.

Пока текущее значение анодного тока в графике больше предыдущего, т. е.

$$I_a(n)(\tau) - I_a(n-1)(\tau) < 0, \quad (1)$$

линия графика постепенно возрастает, приближаясь к своему максимальному значению. Когда график зависимости анодного тока достиг своего максимума, т. е. текущее значение стало меньше предыдущего:

$$I_a(n)(\tau) - I_a(n-1)(\tau) \geq 0, \quad (2)$$

это соответствует началу изменения фазового состояния полимера. После выполнения неравенства, подается команда на отключение режима контроля.

Защита от электрического пробоя осуществляется блоком контроля частичных разрядов, при появлении которых автоматизированная система управления (АСУ) рассчитывает время возникновения событий частичных разрядов:

$$\tau_{чр\ расч} = f(n_{чр}). \quad (3)$$

Действительное время  $\tau_{чр}$  сравнивается с расчетным  $\tau_{чр\ расч}$ .

Выполнение неравенства

$$\tau_{чр} \leq \tau_{чр\ расч} \quad (4)$$

говорит о развитии процесса предпробойного состояния. Однако если выполняется условие, при котором количество частичных разрядов

$$n_{чр} = k_{дчр}, \quad (5)$$

где  $k_{дчр}$  – численное значение последовательно возникших динамических частичных разрядов то система незамедлительно отключает режим диагностики.

В блоке выявления дефектов типа «воздушное включение» (рис. 3) считывается и суммируется количество микроразрядов  $N_{чр}$  и сравнивается с предельным значением, возникающим в процессе диагностирования  $N_{пр}$ .

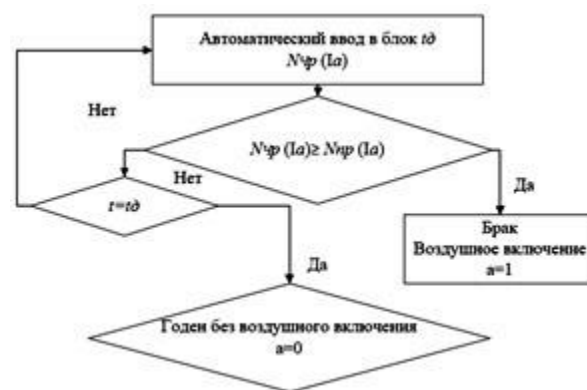


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления процессом диагностики (блок выявления дефектов типа «воздушное включение»)



При выявлении заданного количества микро-разрядов процесс контроля приостанавливается, затем включается блок обработки информации, подается сигнал о наличии в изделии дефекта, после этого запускается блок восстановления изделия. Подробно технологический процесс восстановления рабочих свойств изделий при воздействии высокочастотного поля описан в работах [11–15].

В блоке выявления дефектов типа «содержание влаги» (рис. 4) снимаются показания анодного тока  $I_a$ , обрабатываются мгновенные значения, рассчитывается и выстраивается плавный график данных, соответствующий графику изменения температуры в изделии.

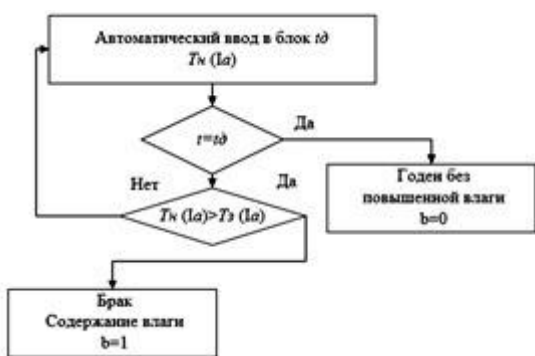


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления процессом диагностики (блок выявления дефектов типа «содержание влаги»)

Учитывая характер изменения анодного тока при достижении максимума  $T = 90 \% T_{пл}$  за время,

меньшее заданного, процесс диагностирования останавливается, запускается блок обработки информации, выводится сообщение о повышенной влаге полимера, после запускается блок процесса восстановления эксплуатационных свойств.

В блоке выявления металлических включений (рис. 5) автоматически снимаются показания значений анодного тока и производится расчет потребляемой энергии  $P_{ном}(I_a)$ .

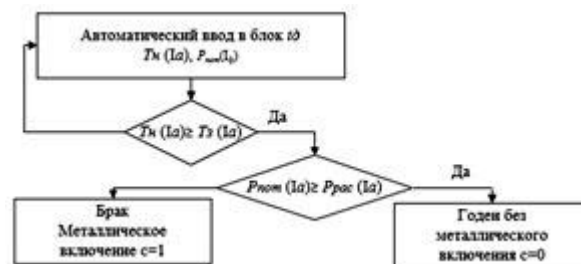


Рис. 5. Блок-схема алгоритма управления процессом диагностики (блок выявления дефектов типа «металлическое включение»)

При достижении максимума анодного тока и в случае, если потребляемая энергия меньше допустимого значения  $P_{рас}(I_a)$ , процесс диагностики завершается, запускается блок обработки информации, выводится сообщение о наличии в изделии дефекта типа «металлическое включение». Кроме этого, автоматизированная система имеет возможность информировать о координатах расположения металлического включения [12].

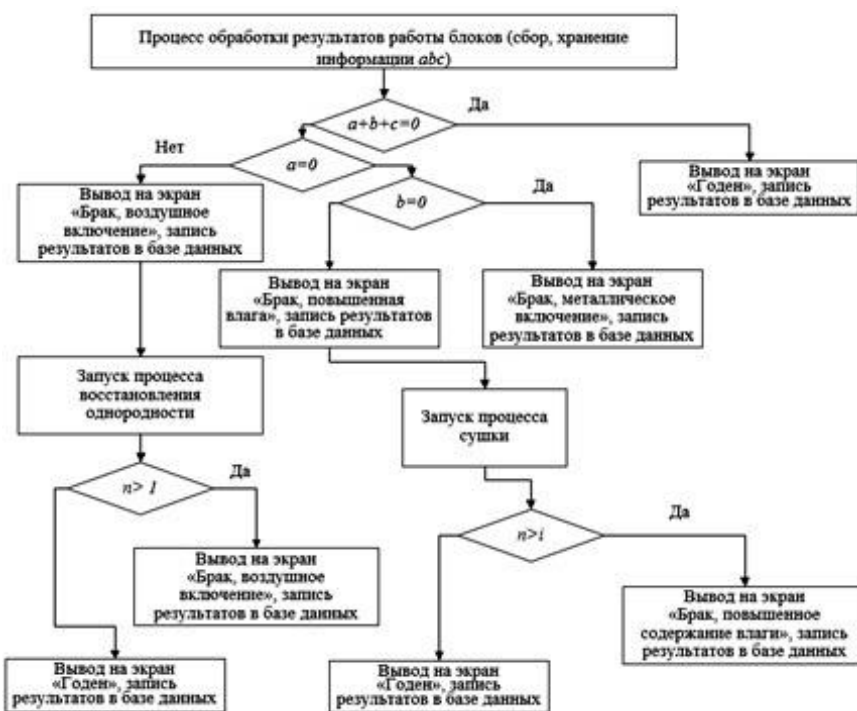


Рис. 6. Блок-схема алгоритма управления процессом диагностики (блок обработки информации)



Блок обработки информации (рис. 6) выводит заключение о годности изделия при длительности контроля в течение заданного расчетного времени и отсутствии сообщений о наличии дефектов.

Информационный блок запускается сразу после отключения режима выявления дефектов. Все полученные результаты в ходе контроля обрабатываются, и система дает окончательное заключение о состоянии изделия. По желанию данную информацию можно записать в базу данных для дальнейших исследований. Если же система обнаружила наличие дефектов «содержание влаги» или «воздушное включение», блок может запускать процесс восстановления эксплуатационных свойств изделия.

После завершения всех процессов контроля и восстановления, отключается программный регулятор, снимается давление с пресса. Затем

происходит отключение системы управления, извлечение объекта контроля и дополнительного технологического обеспечения в виде оснастки, электродов, крепежа.

#### Практическая значимость. Заключение

Созданная автоматизированная система управления процессом высокочастотного диагностирования и ее реализация применительно к разработанному устройству диагностики позволяет производить контроль без механического воздействия на объект исследования, выявлять дефекты различного рода и происхождения в условиях современного производственного процесса, восстанавливать эксплуатационные свойства изделий различной конфигурации, обрабатывать и хранить информацию с целью дальнейших исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России / М.С. Дориомедов и др. // Труды ВИАМ. 2016. №7. Электрон. версия печат. публ. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2018).
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
3. Welty G. Railway Age. 1997. № 8. P. 41–45. URL: <http://center-science.ru/files/zgd.pdf> (дата обращения: 19.10.2018).
4. Ларченко А.Г., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Устройство диагностики полиамидных сепараторов методом высокочастотного излучения // Современные технологии. Современный анализ. Моделирование. 2014. № 4. С. 162–168.
5. Ларченко А.Г. Автоматизированное выявление дефектов в изделиях из полиамидных материалов методом высокочастотного излучения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 41. С. 160–165.
6. Ларченко А.Г. Автоматизированное устройство диагностирования полимерных изделий сложной конфигурации методом высокочастотного излучения // Контроль. Диагностика. 2016. № 2. С. 61–65.
7. Филиппенко Н.Г., Ларченко А.Г., Лившиц А.В. Инновационный метод диагностики изделий из полимерных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : сб. науч. тр. 2013. № 2. С. 437–440.
8. Исследование влияния диэлектрических элементов рабочего конденсатора в высокочастотной электротермической установке на процесс обработки полимерных материалов / А.Г. Ларченко и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование 2013. № 3. С. 2070–275.
9. Ларченко А. Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием изделий из полимерных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 8. № 3 (39). С. 5 – 70.
10. Пат. 132209 Рос. Федерация. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов / А. Г. Ларченко, А. В. Лившиц, С. И. Попов, Н. Г. Филиппенко ; заявл. 10.09.2013.
11. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Машович А.Я. Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2 (30). С. 193–198.
12. Ларченко А.Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием при производстве и эксплуатации изделий из полимерных материалов : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.06. Иркутск, 2014. 164 с.
13. Филиппенко Н.Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов : дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2012. 160 с.
14. Попов С.И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров : дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2013. 120 с.
15. Livshits A.V. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items // Heat and Mass Transfer. 2017.

### REFERENCES

1. Doriomedov M. S., Daskovskii M. I., Skripachev S. Yu., Shein E. A. Polimernye kompozitsionnye materialy v zheleznodorozhnom transporte Rossii [Polymer Composite Materials in the Railway Transport of Russia]. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn. [Proceedings of VIAM: Electron. scientific tech. online journal]*, 2016. No.7. URL: <http://www.viam-works.ru> (access date is Oct 20, 2018).
2. Kablov E.N. Kompozity: segodnya i zavtra [Composites: today and tomorrow]. *Metally Evrazii [Metals of Eurasia]*, 2015. No.1, pp. 36–39.
3. Welty G. «Railway Age», 1997, N 8, pr. 41, 43–45. URL: <http://center-science.ru/files/zgd.pdf> (access date is Oct 19, 2018)



4. Larchenko A. G., Filippenko N.G., Livshits A.V. Ustroistvo diagnostiki poliamidnykh separatorov metodom vysokochastotnogo izlucheniya [Diagnostic device for polyamide separators by high-frequency radiation method]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2014. No. 4, pp. 162 – 168.
5. Larchenko A. G. Avtomatizirovannoe vyavlenie defektov v izdeliyakh iz poliamidnykh materialov metodom vysokochastotnogo izlucheniya [Automated detection of defects in products made of polyamide materials by the method of high-frequency radiation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2014. No.41, pp. 160 – 165.
6. Larchenko A. G. Avtomatizirovannoe ustroistvo diagnostirovaniya polimernykh izdelii slozhnoi konfiguratsii metodom vysokochastotnogo izlucheniya [Automated Device for Diagnosing Polymeric Products of Complex Configuration by the Method of High-Frequency Radiation.]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2016. No. 2, pp. 61 – 65.
7. Filippenko N. G., Larchenko A. G., Livshits A. V. Innovatsionnyi metod diagnostiki izdelii iz polimernykh materialov [Innovative method for diagnosing products from polymeric materials]. *Sbornik nauchnykh trudov. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Collection of scientific papers. Transport infrastructure of the Siberian region], 2013. No.2, pp. 437 – 440.
8. Larchenko A. G., Filippenko N. G., Popov S. I., Livshits A. V. Issledovanie vliyaniya dielektricheskikh elementov rabochego kondensatora v vysokochastotnoi elektrotermicheskoj ustanovke na protsess obrabotki polimernykh materialov [Investigation of the influence of dielectric elements of a working capacitor in a high-frequency electrothermal installation on the processing of polymer materials]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2013.
9. Larchenko A. G. Sistema avtomatizirovannogo upravleniya vysokochastotnym diagnostirovaniem izdelii iz polimernykh materialov [Automated control system for high-frequency diagnostics of products from polymeric materials]. *Mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii»* [Automation. Modern technologies], 2015/8. No. 3 (39), pp. 65 – 70.
10. Larchenko A. G., Livshits A. V., Popov S. I., Filippenko N. G. Ustroistvo diagnostiki detalei iz poliamidnykh materialov [Device for diagnosing parts from polyamide materials]. Pat. 132209 RF MPK G01N29/04. Pending 10.09.2013, No.132209.
11. Filippenko N. G., Livshits A. V., Mashovich A. Ya. Avtomatizatsiya protsessa vysokochastotnogo nagreva materialov na promyshlennoi ustanovke UZP 2500 [Automation of the process of high-frequency heating of materials at an industrial unit UZP 2500]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2011. No. 2 (30), pp. 193–198.
12. Larchenko A. G. Sistema avtomatizirovannogo upravleniya vysokochastotnym diagnostirovaniem pri proizvodstve i ekspluatatsii izdelii iz polimernykh materialov: dis. ... kand. tekh. nauk [Automated control system for high-frequency diagnostics in the production and operation of products from polymeric materials: Ph.D. (Engineering) diss.]. 05.13.06; Irkutsk, 2014. 164 p.
13. Filippenko N. G. Avtomatizatsiya upravleniya protsessom vysokochastotnoi obrabotki polimernykh materialov: dis. kand. tekh. nauk [Automation of the process control of high-frequency processing of polymeric materials: Ph.D. (Engineering) diss.]. 05.13.06. Irkutsk, 2012. 160 p.
14. Popov S. I. Avtomatizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vosstanovleniya ekspluatatsionnykh svoystv polimerov: dis. ... kand. tekh. nauk [Automation of control of technological processes for restoration of polymer operational properties: Ph.D. (Engineering) diss.]. 05.13.06. Irkutsk, 2013. 120 p.
15. Livshits A. V. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. Pushpa Publishing House, Allahabad, India.

### Информация об авторах

### Authors

Ларченко Анастасия Геннадьевна – к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Larchenkoa@inbox.ru

Филиппенко Николай Григорьевич – к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Pentagon@mail.ru

Лившиц Александр Валерьевич – д. т. н., проректор по научной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: livshic\_av@irgups.ru

Anastasiya Gennad'evna Larchenko – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Larchenkoa@inbox.ru

Nikolai Grigor'evich Filippenko – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Pentagon@mail.ru

Aleksandr Valer'evich Livshits – Doctor of Engineering Science, Vice-Rector for Research, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: livshic\_av@irgups.ru

### Для цитирования

### For citation

Ларченко А. Г. Высокочастотная электротермическая автоматизированная технология повышения качества полимерных изделий сложной конфигурации / А. Г. Ларченко, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 8–13. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).8–13

Larchenko A. G., Filippenko N. G., Livshits A. V. Vysokochastotnaya elektrotermicheskaya avtomatizirovannaya tekhnologiya povysheniya kachestva polimernykh izdelii slozhnoi konfiguratsii [High-frequency electrothermal automated technology of improving the quality of polymeric products of complex configuration]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 61, No. 1, pp.8–13. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).8–13