

Моделирование процесса отслоения краски и окисных загрязнений от металлических поверхностей при диэлектрическом нагреве с использованием конечно-элементной системы «Marc»

А. С. Попов✉, М. С. Попов, С. И. Попов

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

✉ popov_as@irgups.ru

Резюме

Рассматривается процесс отслоения покрытий металлических деталей при их очистке. Метод очистки основан на перепаде температур внутри детали (подложки) и покрытия, который приводит к возникновению температурных напряжений, в том числе за счет различий в теплофизических характеристиках покрытия и подложки. Описаны параметры внешнего электромагнитного поля и электрофизические характеристики материалов покрытий металлических поверхностей, влияющие на нагрев в электромагнитных полях ВЧ-диапазона. При оценке эффективности очистки металлических поверхностей значение имеют температура начала отслоения при заданной плотности теплового потока через поверхность и характер изменения теплового сопротивления материала, обусловленного его терморазрушением. Проведен инженерный анализ отслоения краски и окисных загрязнений с металлических поверхностей под воздействием электрического поля высокой частоты с использованием конечно-элементной системы Marc. Произведён расчёт теплового и напряжённо-деформированного состояния. Анализ проводится методом конечных элементов в термомеханической постановке. Рассматривается диэлектрический метод нагрева. Производится вычисление полей температур и напряжённо-деформированного состояния, с целью прогнозирования отслоения покрытия от металлической поверхности. Проведение расчётов поможет снизить число физических испытаний и будет способствовать экономии средств на разработку технологических процессов. Данные расчетов позволяют дать рекомендации по оптимизации параметров ВЧ очистки металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений диэлектрическим методом на промышленном оборудовании. Результаты моделирования могут найти широкое применение при разработке технологических процессов очистки, металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений в поле высокой частоты.

Ключевые слова

очистка металлических поверхностей, высокочастотное излучение, диэлектрический нагрев, Marc, инженерный анализ, тепло-прочностный анализ, технологический процесс

Для цитирования

Попов А. С. Моделирование процесса отслоения краски и окисных загрязнений от металлических поверхностей при диэлектрическом нагреве с использованием конечно-элементной системы «Marc» / А. С. Попов, М. С. Попов, С. И. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 34–38. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).34-38

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.05.2021, поступила после рецензирования: 02.08.2021, принята к публикации: 10.09.2021

Modeling the process of paint peeling off metal surfaces and oxide contamination under dielectric heating using the finite element system “Marc”

A. S. Popov✉, M. S. Popov, S. I. Popov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ popov_as@irgups.ru

Abstract

The process is considered of peeling off of coatings of metal parts during their cleaning. The cleaning method is based on the temperature difference inside the part (substrate) and the coating, resulting in temperature stresses, including those caused by differences in the thermal characteristics of the coating and the substrate. The parameters of the external electromagnetic field and electrophysical characteristics of metal surface coating materials that affect heating in the RF electromagnetic fields are described. When evaluating the cleaning efficiency of metal surfaces, the starting temperature of separation at a given density of heat flow through the surface and the nature of changes in the thermal resistance of the material due to its thermal destruction are important. An engineering analysis of paint and oxide contamination peeling off metal surfaces under the influence of a high-frequency electric field using the finite element system Marc was performed. The calculation of the thermal and stress-strain state is made. Calculations will help to reduce the number of physical tests and save money for the development of technological processes. The analysis is performed by the finite element method in a thermo-mechanical formulation. The dielectric heating meth-

od is considered. The calculation of temperature and stress-strain state fields is performed in order to predict the separation of the coating from the metal surface. The obtained simulation results can be widely used in the development of technological processes for cleaning metal surfaces and parts from paint and oxide contamination in the high frequency electric field.

Keywords

cleaning of metal surfaces, high-frequency radiation, dielectric heating, Marc, engineering analysis, heat and strength analysis, technological process

For citation

Popov A. S., Popov M. S., Popov S. I. Modelirovanie processa otsloeniya kraski i okisny`x zagryaznenij ot metallicheskich pov-erxnostej pri die`lektricheskom nagreve s ispol`zovaniem konechno-e`lementnoj sistemy` "Marc" [Modeling the process of paint peeling off metal surfaces and oxide contamination under dielectric heating using the finite element system "Marc"]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 34–38. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).34-38

Article info

Received: 11.05.2021, Revised: 02.08.2021, Accepted: 10.09.2021

Введение

Метод диэлектрического нагрева является перспективным методом очистки от краски и окисных загрязнений металлических поверхностей. Одним из способов его осуществления – отслоение краски с металлических поверхностей под воздействием электрического поля высокой частоты (ВЧ). Метод основан на возникновении перепада температур внутри покрытия и металлической поверхности и температурных напряжений в результате различия теплофизических характеристик покрытия и поверхности. Управление технологическим процессом очистки производится регулированием мощности, выделяемой в материале покрытия очищаемой заготовки. Количество тепла, выделяемого в материале покрытия, зависит от частоты тока, напряженности электрического поля и свойств материала. Количество мощности, которая выделяется в покрытии можно определить по формуле:

$$P = 2\pi f E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала; ε_0 – электрическая постоянная вакуума; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла поглощения; f – частота тока; E – напряженность электрического поля.

Мощность, необходимую для нагрева материала до заданной температуры, можно выразить следующим уравнением:

$$P = C_p \rho \frac{T_1 - T_2}{\tau}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; T_1 – температура материала после нагрева; T_2 – начальная температура материала; τ – время нагрева.

Приравняв правые части выражения (1) и (2), найдем время нагрева:

$$\tau = C_p \rho \frac{C_p \rho (T_1 - T_2)}{2\pi f E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta \xi_m},$$

где ξ_m – термический коэффициент.

Исходя из приведенных зависимостей, для управления процессом разогрева удаляемой поверхности необходимо регулировать напряженность электрического поля E , частоту тока f , а также время воздействия ВЧ излучения τ . Максимальный предел напряженности поля определяется электрической прочностью материала, т. е. напряженностью поля, приводящей к пробое или разрушению диэлектрика. Рабочая частота определяется технической характеристикой генератора. В промышленности используются установки с частотой 40–80 МГц. При этом произведение $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ называют фактором диэлектрических потерь. У неполярных материалов этот фактор имеет достаточно низкое значение, поэтому неполярные материалы высокочастотным методом почти никогда не нагреваются. Полярные материалы очень быстро нагреваются в поле ВЧ, вследствие того, что фактор диэлектрических потерь имеет достаточно большое значение. Чем больше это значение у материала, тем выше его полярность, и тем лучше он поддается нагреву в ВЧ-поле. Ориентировочные значения $\operatorname{tg} \delta$ для оценки разогрева диэлектрическим методом: материалы с $\operatorname{tg} \delta$ до 0,1 очень хорошо нагреваются; $\operatorname{tg} \delta$ до 0,01 нагреваются; $\operatorname{tg} \delta$ ниже 0,01 не нагреваются. При нагреве материалов тепло частично выделяется также за счет наличия полярных примесей в материале покрытия. Если в удаляемом покрытии содержатся свободные ионы, то в электрическом поле ВЧ появляются ионы проводимости, следовательно, выделяется тепло. Однако основной эффект вносит движение полярных диполей. При оценке эффективности и отладки температурно-скоростного режима очистки металлических поверхностей значение имеет температура начала отслоения при заданной мощности теплового потока через поверхность и характер изменения теплового сопротивления материала, обусловленного его терморазрушением [1–11]. Данная задача решается путем моделирования и проведения инженерного анализа процесса отслоения покрытий ме-

таллических поверхностей с использованием конечно-элементной системы «Magc» [12–17].

Описание параметров модели

В работе решение строится в плоской постановке. Рассматривается область AECF, представляющая собой покрытие ABCD (рис. 1), нанесенное на металлическую подложку BEDF. Покрытие на участке GHIJ (рис. 2) разогревается под действием ВЧ-поля. Материалом покрытия служит полиэстер, подложка выполнена из стали. Сетка конечных элементов состоит из 840 элементов и 3 783 узлов. Физико-механические характеристики материалов: для полиэстера – коэффициент температурного расширения $\alpha = 60\text{--}125 \cdot 10^{-6}$, модуль упругости $E = 2\,900\text{--}3\,800$ МПа; для стали – коэффициент Пуассона $\nu =$

$0,25$, модуль упругости $E = 200\,000$ МПа, коэффициент температурного расширения $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$.

Моделирование термо-напряженно-деформированного состояния

Решается задача моделирования переходного теплового процесса, во временной области (рис. 2).

Выделение тепловой мощности в покрытии происходит при воздействии на него электромагнитного поля ВЧ. Решатель «Magc» автоматически рассчитывает тепловые потоки, возникающие в заготовке. Если в начале процесса нагрева напряжения в покрытии отсутствуют, то по мере нагрева напряжения возрастают. Из-за значительной разности значений модуля упругости покрытия $E = 2\,900\text{--}3\,800$ МПа и материала подложки $E = 200\,000$ МПа,

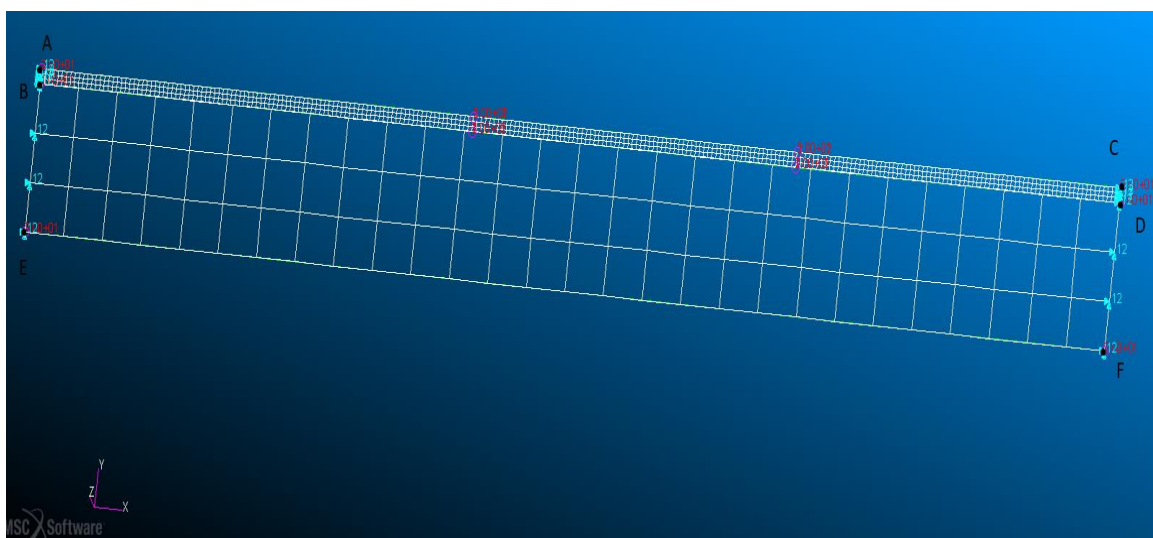


Рис. 1. Расчетная схема заготовки в исходном состоянии

Fig. 1. Calculated scheme of a billet in the initial state

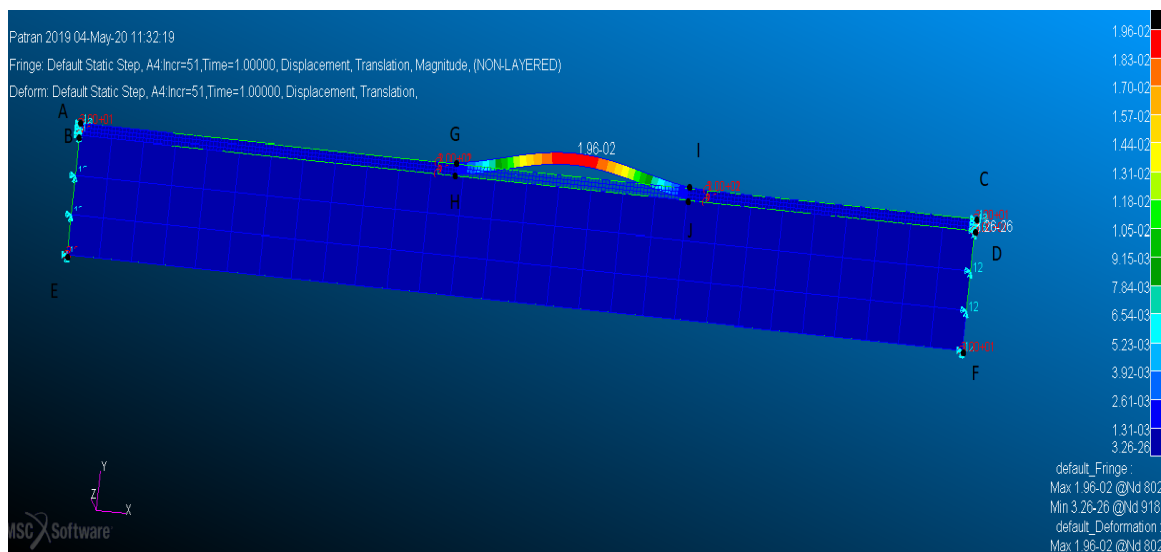


Рис. 2. Расчетная схема заготовки в процессе моделирования нагрева очищаемой поверхности

Fig. 2. Calculated scheme of a billet in the process of simulating the heating of the surface being cleaned

а также разницы толщин, возникающие напряжения приводят к деформации и отслоению покрытия. В стальной подложке напряжения от давления покрытия весьма незначительны и не вызывают ее существенной деформации. В целом система «Марс» решает тепловую задачу в полной постановке, имеется возможность добавить другие виды теплопередачи, например, конвекцию, излучение, выделение тепла от трения и пластических деформаций. В данной задаче этими факторами решено пренебречь.

Заключение

Описан комплексный подход к моделированию отслоения покрытий металлических деталей при их очистки ВЧ методом с использованием системы «Марс». Приведены основные исходные дан-

ные, требуемые для расчета, описана расчетная схема и основные допущения при моделировании, возможности получения результатов. Определено напряженно-деформированное состояние заготовки. Описание методики расчета ВЧ очистки позволяет оценить ее применимость к решению производственных задач. Проведение расчетов помогает снизить число физических испытаний и способствует экономии средств на разработку технологических процессов. Полученные данные позволяют дать рекомендации по оптимизации параметров ВЧ очистки металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений диэлектрическим методом на промышленном оборудовании.

Список литературы

1. Пат. 194234 Рос. Федерация. Установка для нанесения полимерных порошковых покрытий. Попов М.С., Попов А.С., Лившиц А.В. и др. № 2019118169 ; заявл. 11.06.2019 ; опубли. 03.12.2019. Бюл. № 34.
2. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life / D.V. Butorin, N.G. Filippenko, A.V. Livshits et al. // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. С. 012010. DOI:10.1088/1757-899X/760/1/012010.
3. Высокочастотная электротермия : справочник / под редакцией А.В. Донского М. : Машиностроение, 1965. 156 с.
4. Лившиц А.В. Управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 120–126.
5. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К. Высокочастотная обработка полимерных материалов. Организация систем управления. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2013. 172 с.
6. Филиппенко Н.Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов : дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2012. 158 с.
7. Ларченко А.Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием изделий из полимерных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 8. С. 3–8.
8. Экспериментальные исследования возможности восстановления изделий из полимерных материалов / С.И. Попов, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2013. С. 430–437.
9. Коляно Ю.М., Кулик А.Н. Температурные напряжения от объемных источников. Киев : Наукова думка, 1983. 288 с.
10. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М. : Наука, 1966. 636 с.
11. Попов С.И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров : дис. ... кан. тех. наук. Иркутск, 2013. 150 с.
12. Ларченко А.Г., Филиппенко Н.Г. Высокочастотное диагностирование машиностроительных изделий из полимерных материалов // Технология машиностроения. 2020. № 11. С. 55–63.
13. Александров А.А. Моделирование остаточных напряжений при закалке алюминиевых сплавов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2017. Т. 1. С. 391–396.
14. Ларченко А.Г. Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 23. № 3 (146). С. 463–471.
15. Буторин Д.В. Автоматизация управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов разной степени полярности : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018.
16. Баканин Д.В. Автоматизация электромагнитной модификации полимеров воздействием импульсного ВЧ-поля // XIV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всерос. науч. конф. Вологда, 2020. С. 175–178.
17. Alexandrov A.A. Modeling of non-uniform distribution of thermal residual stresses // VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway : conference proceedings. China ; Irkutsk, 2018. С. 464–466.

References

1. Popov M.S., Popov A.S., Livshits A.V., Popov S.I. *Ustanovka dlya naneseniya polimernykh poroshkovykh pokrytiy [Installation for applying polymer powder coatings]* // Utility model patent: No.194234, State register of utility models. Patent application for utility model No. 2019118169 dated June 11, 2019. Publ.: December 03, 2019. Bull. No. 34.
2. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, P. 012010.
3. *Vysokochastotnaya elektrotermiya : spravochnik. Pod redaktsiyey A.V. Donskogo [High-frequency electrothermia: reference book. In Donskoy A.V. (ed.)]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1965. 156 p.*
4. Livshits A.V. *Upravlenie tekhnologicheskimi processami vysokochastotnoj elektrotermii polimerov [Management of technological processes of high-frequency electrothermie of polymers]. Problemy mashinostroyeniya i avtomatizacii [Mechanical engineering and automation problems]*, 2015, No. 3, pp. 120–126.

5. Livshits A.V., Filippenko N.G., Kargapol'tsev S.K. Vysokochastotnaya obrabotka polimernykh materialov. Organizatsiya sistem upravleniya [High-frequency processing of polymeric materials. Organization of management systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2013. 172 p.
6. Filippenko N.G. Avtomatizatsiya upravleniya processom vysokochastotnoj obrabotki polimernykh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Automation of control over the process of high-frequency processing of polymeric materials: Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk, 2012. 158 p.
7. Larchenko A.G. Sistema avtomatizirovannogo upravleniya vysokochastotnym diagnostirovaniyem izdeliy iz polimernykh materialov [Automated control system for high-frequency diagnostics of products made of polymer materials]. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], 2015, No. 8, pp. 3–8.
8. Popov S.I., Livshits A.V., Filippenko N.G. Eksperimental'nyye issledovaniya vozmozhnosti vosstanovleniya izdeliy iz polimernykh materialov [Experimental studies of the possibility of restoring products made of polymer materials]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2013, pp. 430–437.
9. Kolyano Yu.M., Kulik A.N. Temperaturnyye napryazheniya ot ob'yemnykh istochnikov [Temperature stresses from volumetric sources]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 288 p.
10. Timoshenko S.P., Voinovsky-Krieger S. Plastinki i obolochki [Plates and shells]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 636 p.
11. Popov S.I. Avtomatizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vosstanovleniya ekspluatatsionnykh svoystv polimerov: dis. ... kan. tekhn. nauk [Automation of control of technological processes of restoration of operational properties of polymers: Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk: 2013. 150 p.
12. Larchenko A.G., Filippenko N.G. Vysokochastotnoye diagnostirovaniye mashinostroitel'nykh izdeliy iz polimernykh materialov [High-frequency diagnostics of machine-building products made of polymer materials]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Technology of mechanical engineering], 2020, No. 11, pp. 55–63.
13. Alexandrov A.A. Modelirovaniye ostatochnykh napryazheniy pri zakalke alyuminiyevykh splavov [Modeling of residual stresses during hardening of aluminum alloys]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2017, Vol. 1, pp. 391–396.
14. Larchenko A.G. Otsenka kachestva izdeliy iz polimernykh materialov mashinostroitel'nogo naznacheniya [Quality assessment of products made of polymer materials for machine-building purposes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2019, Vol. 23, No. 3(146), pp. 463–471.
15. Butorin D.V. Avtomatizatsiya upravleniya protsessami vysokochastotnoy obrabotki polimernykh materialov raznoy stepeni polyarnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Automation of control of processes of high-frequency processing of polymer materials of different degrees of polarity: author. Ph.D. (Engineering) diss.]. Krasnoyarsk, 2018. 174 p.
16. Bakanin D.V. Avtomatizatsiya elektromagnitnoy modifikatsii polimerov vozdeystviyem impul'snogo VCH-polya [Automation of electromagnetic modification of polymers by the action of a pulsed RF field]. *XIV Yezhegodaya nauchnaya sessiya aspirantov i molodykh uchenykh: materialy Vseros. nauch. konf.* [The XIV Annual scientific session of graduate students and young scientists. Materials of the All-Russian Scientific Conference: in 3 vols.]. Vologda, 2020, pp. 175–178.
17. Alexandrov A.A. Modeling of non-uniform distribution of thermal residual stresses. *VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway. conference proceedings*, 2018, pp. 464–466.

Информация об авторах

Попов Александр Сергеевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: popov_as@irgups.ru

Попов Максим Сергеевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: popov_as@irgups.ru

Попов Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: popov_si@irgups.ru

Authors

Alexander S. Popov – graduate student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail popov_as@irgups.ru

Maksim S. Popov – graduate student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail popov_as@irgups.ru

Sergey I. Popov – Ph.D. in Engineering Science, Associate professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: popov_si@irgups.ru