

А. В. Каляшина, В. Б. Есов

РОЛЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ПРОЦЕССЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ СЕРВОПРИВОДА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Ключевые слова: математическая модель, астатическое регулирование, передаточная функция, структурная схема, сервопривод.

Данное исследование посвящено проектированию регулятора для сервопривода робота. Для обеспечения движения в робототехническом комплексе часто используют двигатели постоянного тока, входящие в состав сервопривода промышленного комплекса лазерной сварки. В качестве сервопривода может быть любой тип механического привода с сенсорными устройствами положения, скорости, усилия, а также блок управления приводом, например, в виде электронной схемы для автоматического регулирования необходимых параметров технологического процесса. В настоящее время производители устанавливают сервоприводы на каждую управляемую ось робота. Автоматическое регулирование параметров процесса осуществляется известными математическими законами: пропорциональным, интегральным, дифференциальным. При этом пропорциональный и дифференциальный законы являются статическими, то есть не обеспечивают требуемой точности, сохраняя статическую ошибку. Интегральная составляющая обеспечивает астатизм системы, тем самым обеспечивая точность, но ухудшая качество переходного процесса – снижаются запасы устойчивости и вид процесса становится колебательным. Ранее авторами было проведено исследование пропорционального регулирования сервопривода робота [1]. В данной статье представлены результаты оценки влияния интегральной составляющей на устойчивость и качество переходного процесса. В качестве регулируемого выходного параметра выбрана угловая скорость вращения вала двигателя сервопривода. Требуемые показатели качества процесса выбраны для процесса лазерной сварки металлов толщиной от 0,1 до 10 мм: время регулирования не более 1 секунды, вид переходного процесса – затухающие колебания [1]. Моделирование и расчеты выполнены в пакете математического моделирования Matlab. Исследование проводилось в два этапа: с учетом и без учета внешнего воздействия. Выбрана двухконтурная структурная схема с конурами регулирования по положению и скорости. Интегральная составляющая добавлялась поэтапно в П-регулятор сначала в контур положения, затем в контур скорости. Переходные процессы с интегральной составляющей в контуре положения получились расходящимися и в дальнейшем не исследовались. Для оценки устойчивости и качества переходного процесса выбран ПИ-регулятор в контуре скорости. Также проведена оценка влияния коэффициентов регуляторов на параметры переходного процесса и устойчивость. Для обеспечения заданного переходного процесса были значительно увеличены коэффициенты интегральной составляющей регулятора, что привело к увеличению колебательности процесса. Для компенсации колебаний при сохранении заданного быстродействия были увеличены коэффициенты пропорциональной составляющей контура скорости и контура положения

А. В. Kalyashina, В. В. Esov

THE ROLE OF AN INTEGRAL COMPONENT IN THE CONTROL PROCESS OF AN INDUSTRIAL ROBOT SERVO DRIVE

Keywords: mathematical model, astatic control, transfer function, structural diagram, servo drive.

This study focuses on the design of a controller for a robot servo drive. DC motors, which are part of the servo drive of an industrial laser welding system, are often used to provide motion in robotic systems. A servo drive can be any type of mechanical drive with position, speed, and force sensors, as well as a drive control unit, such as an electronic circuit for automatically regulating the required process parameters. Currently, manufacturers install servo drives on each controlled axis of a robot. Automatic regulation of process parameters is achieved using well-known mathematical laws: proportional, integral, and differential. Proportional and differential laws are static, meaning they do not provide the required accuracy, maintaining a static error. The integral component ensures astatic behavior of the system, thereby ensuring accuracy but degrading the transient process quality—stability margins are reduced, and the process becomes oscillatory. The authors previously conducted a study of proportional control of a robot servo drive [1]. This article presents the results of an assessment of the influence of the integral component on the stability and quality of the transient process. The angular velocity of the servo motor shaft was selected as the controlled output parameter. The required process quality indicators were selected for laser welding of metals with a thickness of 0.1 to 10 mm: a control time of no more than 1 second, and the transient process type of damped oscillations. Modeling and calculations were performed using the Matlab mathematical modeling package. The study was conducted in two stages: with and without external influences. A dual-loop structural diagram with position and speed control loops was selected. The integral component was added in stages to the P-controller, first to the position loop, then to the speed loop. Transient processes with the integral component in the position loop turned out to be divergent and were not further investigated. To assess the stability and quality of the transient process, a PI controller was selected in the speed loop. The impact of controller gains on transient response parameters and stability was also assessed. To ensure the specified transient response, the integral gains of the controller were significantly increased, which resulted in increased process oscillation. To compensate for oscillations while maintaining the specified response speed, the proportional gains of the velocity and position loops were increased.

Введение

На сегодняшний день любая компания старается автоматизировать как можно больше процессов. В случае же с процессом лазерной сварки автоматизация позволяет существенно повысить производительность и качество сварного соединения, снизить количество персонала, а также снизить стоимость производства и исключить влияние на технологический процесс человеческого фактора [1].

Для автоматизации процессов сварки обычно используют робототехнические комплексы, оснащенные различными устройствами слежения, регистрации и контроля параметров всего процесса [2]. При таком подходе в задачи человека-оператора входят обслуживающие и контролирующие функции, например, настройка параметров роботизированного комплекса с учетом особенностей технологического процесса, контроль состояния оборудования, контроль безопасных условий работы.

Для обеспечения движения в робототехническом комплексе часто используют двигатели постоянного тока, входящие в состав сервопривода промышленного комплекса лазерной сварки. В качестве сервопривода может быть любой тип механического привода с сенсорными устройствами положения, скорости, усилия, а также блок управления приводом, например, в виде электронной схемы для автоматического регулирования необходимых параметров технологического процесса [3].

В настоящее время фирмы производители устанавливают сервоприводы на каждую управляемую ось робота. Состав сервопривода [3],[4]:

- двигатель постоянного тока;
- редуктор;
- датчики обратной связи, контролирующие угол поворота;
- блок питания;
- конвертер.

Задача редуктора - обеспечение выходной величины скорости вращения вала привода [1].

Для контроля роботизированного процесса лазерной сварки обычно применяются системы промышленной автоматики [4]. Подобные системы собирают и обрабатывают информацию, а также формируют управляющие и регулирующие воздействия на процесс.

Различают следующие виды систем промышленной автоматики [5]:

- системы автоматической сигнализации, которые предназначены для извещения обслуживающего персонала о состоянии той или иной технической установки, о протекании того или иного процесса;
- системы автоматического контроля, которые без участия человека осуществляют контроль различных параметров, характеризующих работу какого-либо технического устройства или протекание какого-либо процесса;
- системы автоматического блокирования и защиты, которые служат для предотвращения

возникновения аварийных ситуаций в технических агрегатах и установках;

- системы автоматического пуска и остановки, которые обеспечивают включение, останов (а иногда и реверс) двигателей и приводов по заранее заданной программе;
- системы автоматического регулирования, которые предназначены для управления либо работой тех или иных технических систем, либо теми или иными процессами

Автоматическое регулирование параметров процесса осуществляется известными математическими законами [1,6,]:

- пропорциональный (П-регулятор);
- интегральный (И-регулятор)
- дифференциальный (Д-регулятор)

На практике используются сочетания законов, например: пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор), пропорционально-дифференциальный (ПД-регулятор), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-регулятор) [1].

Все эти законы регулирования используются в сервоприводах промышленного робота. Необходимо помнить, что пропорциональный и дифференциальный законы являются статическими, то есть не обеспечивают 100% точность из-за наличия статической ошибки. Для устранения статической ошибки и повышения точности регулирования в статический закон добавляют интегральную составляющую, то есть обеспечивают астатизм системы, но при этом несколько снижаются запасы устойчивости по фазе и амплитуде и в переходном процессе возникают колебания. [3,7].

В статье [1] проведено исследование процесса пропорционального регулирования сервопривода промышленного робота. Основной вывод исследования – пропорциональный регулятор не способен устранить статическую ошибку, но изменения коэффициенты можно добиться приемлемых результатов [1]. Статическая ошибка при внешнем воздействии на систему составила 0,0248 радиан [1]. Статическая ошибка линейно растёт с увеличением уровня внешнего воздействия, соответственно мы имеем прямую пропорциональную зависимость статической ошибки от уровня внешнего воздействия. Таким образом используя только пропорциональные регуляторы, невозможно исключить статическую ошибку и, следовательно, достаточную точность реализации процесса.

Исследования процесса регулирования продолжены с использованием интегрального закона. В данной статье приведены результаты исследования влияния интегрального закона на процесс регулирования угловой скорости вращения вала двигателя.

Уравнение интегрального закона регулирования [8]:

$$r(t) = \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt,$$

В этом законе управляющее воздействие $r(t)$ зависит от интеграла накопленной за

определенное время ошибки $\varepsilon(t)$. За счет обеспечения астатического регулирования повышается точность, но возможно появление колебательных процессов. [3,9].

Пропорционально-интегральный закон регулирования является суммой двух законов [10]:

$$r(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt,$$

Итак, исходные параметры определены в [1]: объект исследования – двигатель постоянного тока с редуктором промышленного сварочного робота Fanuc ARC.

Регулируемый параметр – угловая скорость вращения вала двигателя, от которой зависит скорость сканирования сварного шва [1].

Задача исследования определена в статье [1] – обеспечение заданного углового положения выходного звена двигателя постоянного тока – вала редуктора с обеспечением устойчивости и заданных показателей качества переходного процесса.

Требуемые показатели качества процесса регулирования скорости лазерной сварки металлов толщиной от 0,1 до 10 мм: время регулирования не более 1 секунды, вид полученного процесса – без колебаний [1], [6], [10].

В статье [1] представлена математическая модель двигателя постоянного тока, в которую входят уравнения электрического и механического равновесия. Система реализует принцип подчиненного регулирования, используя контуры обратной связи для контроля скорости вращения вала и перемещения. [1], [11]. Схема системы регулирования представлена на рис.1

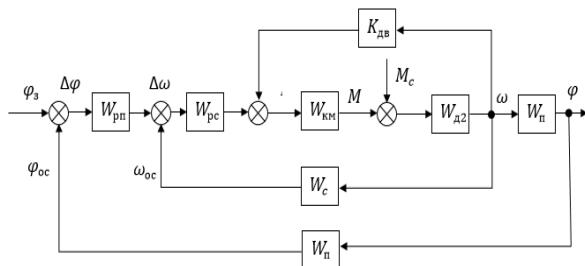


Рис. 1 – Структурная схема регулирования сервопривода

Fig. 1 – Structural diagram of a servo drive

На рисунке 1: W_{pn} , W_{pc} – передаточные функции регуляторов положения и скорости [1];

W_{km} , W_c , W_n – передаточные функции датчиков момента, угловой скорости и углового перемещения;

Задача исследования состоит из следующих этапов:

1. Исследовать двухконтурную систему с разным сочетанием законов регулирования:

а) ПИ-регулятор в контуре положения (перемещения) и П-регулятор в контуре скорости

б) ПИ-регулятор в контуре скорости и П-регулятор в контуре положения

2. Оценить влияние коэффициентов регуляторов на устойчивость и переходный процесс.

3. Исследовать систему с учетом внешнего возмущающего фактора – момента нагрузки на двигатель, эквивалентное крутящему моменту сопротивления, которое имитирует скачки напряжения на обмотках двигателя. [7, 14]

В качестве программной среды выбран пакет математического моделирования MatLab

Требования к процессу определены эмпирически [1,12]:

- быстродействие не более 1 секунды,
- переходный процесс устойчивый (с учетом колебаний)

- входной сигнал – перемещение на 1 радиан

Часть 1. ПИ-регулятор в контуре положения и П-регулятор в контуре скорости (рис. 2)

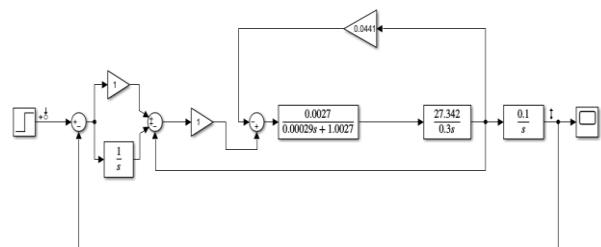


Рис. 2 – Структурная схема сервопривода ПИ регулятором в контуре положения

Fig. 2 – Structural diagram of a servo drive with a PI controller in the position loop

При любых значениях коэффициентов регуляторов были получены неустойчивые переходные процессы с расходящимися колебаниями. Дальнейшие исследования приняты нецелесообразными.

Часть 2. ПИ-регулятор в контуре скорости и П-регулятор в контуре положения (рис.3)

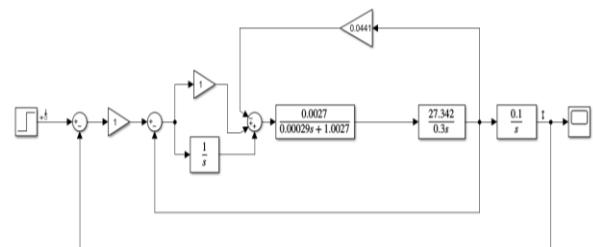


Рис. 3 – Структурная схема сервопривода ПИ регулятором в контуре скорости

Fig. 3 – Structural diagram of a servo drive with a PI controller in the speed loop

При единичных коэффициентах регуляторов получен следующий переходный процесс (время регулирования 42 с, рис.4).

Для определения устойчивости использован частотный критерий Найквиста (диаграмма Боде для логарифмической плоскости) [13], получены достаточные запасы устойчивости по фазе $\Delta\phi = 89.5$ градусов и амплитуде $\Delta L = 10.7$ децибел.

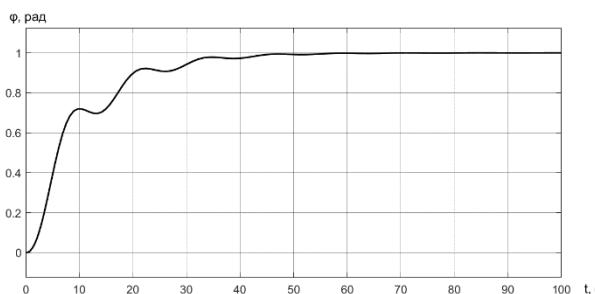


Рис. 4 – Переходный процесс системы с ПИ-регулятором в контуре скорости

Fig. 4 – Transient process of a system with a PI controller in the speed loop

Часть 3. Оценка влияния коэффициентов регуляторов на устойчивость и качество переходного процесса.

При повышении коэффициента передачи пропорционального регулятора контура положения, уменьшается время переходного процесса, но также снижаются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе.

При повышении коэффициента передачи пропорционального регулятора контура скорости, снижается колебательность процесса и увеличиваются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе, но при этом заметно снижается быстродействие. Таким образом, проявляется известное противоречие между точностью процесса и устойчивостью [1],[5],[13]

Коэффициенты регуляторов положения и скорости изменялись в пределах от 1 до 50.

Комбинируя коэффициенты передачи П и ПИ регуляторов можно добиться желаемого переходного процесса и необходимых запасов устойчивости системы. В процессе исследования определены – быстродействие t_p , запасы устойчивости по амплитуде ΔL и по фазе $\Delta\varphi$. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты подбора коэффициентов регулятора

Table 1 – Results of selection of regulator coefficients

Параметры регуляторов	Переходный процесс	Устойчивость
Контур положения ПИ: $P_{\Pi} = 1; T_i = 1$ Контур скорости П: $P_c = 1$	Расходящиеся колебания	Система не устойчива
Контур положения П: $P_{\Pi} = 1$ Контур скорости ПИ: $P_c = 1; T_i = 1$	Колебательный $t_p = 42,2$ с	Система устойчива $\Delta L = 10,7$ дБ $\Delta\varphi = 89,5$ °
Контур положения П: $P_{\Pi} = 30$ Контур скорости ПИ: $P_c = 50; T_i = 10$	Монотонный $t_p = 0,984$ с	Система устойчива $\Delta L = 61,2$ дБ $\Delta\varphi = 76,6$ °

Часть 4. Исследование системы с учетом внешнего воздействия и ПИ-регулятором в контуре скорости

При наличии ПИ-регулятора в системе отсутствует статическая ошибка, но при этом изменяемое внешнее воздействие может оказывать значительное влияние на параметры переходного процесса [6,15].

Установим уровень внешнего воздействия 1 Н*м [16] и оценим параметры переходного процесса. Параметры регуляторов оставим следующие (определенны на 3-м этапе):

$$P_{\Pi} = 30; P_c = 50; T_i = 10$$

При исследовании с указанными коэффициентами оказалось, что система имеет статическую ошибку и компенсировать ее получается на очень большом промежутке времени (примерно 2000 секунд), что не приемлемо при регулировании робота. Для исправления ситуации был проведен экспериментальный подбор коэффициентов в следующих диапазонах:

Диапазон подбора коэффициентов:

Контур положения: P_{Π} от 30 до 45

Контур скорости: P_c от 50 до 100 T_i от 1 до 400

Для обеспечения заданного переходного процесса пришлось сильно увеличить коэффициент передачи интегральной составляющей регулятора, что в итоге привело к увеличению колебательности процесса. Пришлось компенсировать колебания повышением коэффициента пропорционального регулятора контура скорости. Это же в свою очередь привело к увеличению времени переходного процесса, для уменьшения которого пришлось немного увеличить коэффициент передачи пропорционального регулятора контура положения.

Приемлемый результат исследования получен при сочетании коэффициентов:

$$P_{\Pi} = 45; P_c = 100, T_i = 400.$$

Вид переходного процесса представлен на рис. 5.

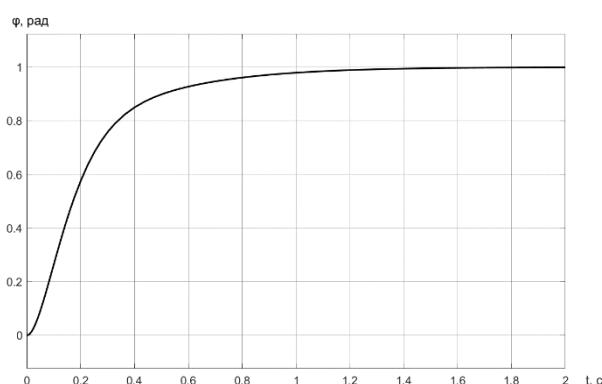


Рис. 5 – График переходного процесса

Fig. 5 – Transition process schedule

В результате время переходного процесса составило примерно 1,02 секунды, что близко к требуемому значению (1 секунда).

Запас устойчивости по амплитуде $\Delta L = 56,2$ децибел, по фазе $\Delta\varphi = 82,3$ градусов.

Таким образом, система имеет необходимые показатели качества и устойчивости при следующих коэффициентах регуляторов:

$$P_{\Pi} = 45; P_C = 100; T_i = 400.$$

Если при этих же параметрах регуляторов не учитывать изменения внешнего воздействия, то можно обеспечить увеличение быстродействия системы примерно до 0,94 с.

Также было проведено исследование системы при возрастании внешнего воздействия от 0 до 1 Н*м. Результаты приведены в таблице 2

Таблица 2 – Результаты исследования внешнего воздействия

Table 2 – Results of the study of external influence

Время переходного процесса, с	Внешнее воздействие, Н*м
0.936	0
0.946	0.1
0.955	0.2
0.964	0.3
0.972	0.4
0.98	0.5
0.989	0.6
0.996	0.7
1.004	0.8
1.012	0.9
1.019	1

Среднее изменение времени переходного процесса составило 0,0083 секунды. Средняя абсолютная погрешность составила в 0,00076 секунд. Относительная погрешность 9,2%.

Заключение

В данном исследовании проведен анализ влияния интегральной составляющей закона регулирования на вид и качество переходных процессов сервопривода сварочного робота на основе двигателя постоянного тока. В качестве регулируемого параметра выбрана угловая скорость вращения вала двигателя, от которой зависит скорость сканирования сварного шва. Исследования проведены с учетом требований для процесса лазерной сварки металлов толщиной от 0,1 до 10 мм, время регулирования не более 1 секунды и обеспечение монотонности протекания переходного процесса. Структурная схема содержит два контура регулирования: по положению и по скорости.

Исследование состояло из 4-х частей и проводилось в среде MatLab: исследование двухконтурной системы с разным сочетанием законов регулирования, оценка влияния коэффициентов и внешнего возмущения на устойчивость и параметры переходного процесса.

В результате был сделан вывод, что при добавлении интегральной составляющей в контур положения получаются неустойчивые переходные процессы. Поэтому дальнейшее исследование проводилось с П-регулятором в контуре положения и ПИ-регулятором в контуре скорости.

При повышении коэффициента передачи пропорционального регулятора контура положения, соответственно уменьшается время переходного процесса, но также снижаются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе.

При повышении коэффициента передачи пропорционального регулятора контура скорости, снижается колебательность процесса и увеличиваются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе, но при этом заметно снижается быстродействие.

Основной вывод исследования – интегральная составляющая устраняет статическую ошибку и оказывает значительное влияние на колебательность и быстродействие переходного процесса при определенном сочетании коэффициентов П и ПИ регуляторов.

Литература

1. А.В. Каляшина, Ю.С. Смирнов *Вестник Технологического университета*, 28, 5, 99-104. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_99 (2025)
2. А.А. Жиленков, Л. Гуанюо, Л. Жуйлэ *Качество и жизнь*, 2 (14), 90-94 (2017)
3. К. Ю. Котов, А. С. Мальцев, А. А. Несторов *Автометрия*, 49, 6, 42-50 (2013)
4. М.П. Белов, Д.Х. Чан, Ч.Х. Фыонг, *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*, 4, 66-72 (2018)
5. М. Г. Нуриев, Е. С. Белашова, К. А. Барабаш *Программные системы и вычислительные методы*, 1, 1-12. (2023)
6. Ю.Н. Смирнов, А.И. Абдуллин, А.В. Каляшина, *Научно-технический вестник Поволжья*. 6, 106-109. (2023)
7. А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин *Мехатроника, автоматизация, управление*, 19, 7, 486-496 (2018) - DOI 10.17587/mau.19.486-496.
8. Т. Орловска-Ковальска, С. Ю. Ловлин, М. Х. Цветкова. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 62, 4, 346-354. (2019) – DOI 10.17586/0021-3454-2019-62-4-346-354.
9. Z. M. Gizatullin, R. M. Gizatullin, M. G. Nuriev *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus*, 120-123 (2020)
10. А. С. Катасев, Д. В. Катасева, А. А. Сибгатуллин, Г. Л. Дегтярев, *Вестник Технологического университета*, 27, 12, 130-135. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_12_130 (2024)
11. З. М. Гизатуллин, Р. М. Гизатуллин, М. Г. Нуриев *Радиотехника и электроника*, 66, 6, 609-613 (2021)
12. Е. К. Самыгина, Л. Н. Рассудов, А. П. Балковой, *Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ*, 2, 57-64 (2019) - DOI 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64
13. А.В. Каляшина., *Вестник Технологического университета*, 27, 12, 147-152 (2024) 10.55421/1998-7072_2024_27_12_147
14. А.В. Каляшина, Ю.Н. Смирнов *Вестник Технологического университета*, 27, 6, 84-89 (2024) – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_6_84
15. А.В. Каляшина, Т.С. Евдокимова, Ю.Н. Смирнов, *Вестник МГТУ "Станкин"*, 63, 4, 64-69. (2022)
16. Т.Р. Кузнецова, Т.А. Акименко, *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2, 344-348 (2021) - DOI 10.24412/2071-6168-2021-2-344-348.

References

1. A.V. Kalyashina, Yu.N. Smirnov *Herald of Technological University*, 28, 5, 99-104. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_99 (2025)
- 2 A.A. Zhilenkov, L.Guanyao, L.Ruiley *Quality and Life*, 2 (14), 90-94 (2017)
3. K. Yu. Kotov, A. S. Maltsev, A. A. Nesterov *Avtometriya*, 49, 6, 42-50 (2013)
4. M. P. Belov, D. H. Chan, C. H. Phuong, *Izvestiya SPbGETU LETI*, 4, 66-72 (2018)
5. M. G. Nuriev, E. S. Belashova, K. A. Barabash *Software systems and computational methods*, 1, 1-12. (2023)
6. Yu.N. Smirnov, A.I. Abdullin, A.V. Kalyashina, *Scientific and Technical Herald of the Volga Region*. 6, 106-109.(2023)
7. A. Yu. Ivoylov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin *Mechatronics, automation, control*, 19, 7, 486-496 (2018) - DOI 10.17587/mau.19.486-496.
8. T. Orlowska-Kowalska, S. Yu. Lovlin, M. H. Tsvetkova. *News of higher educational institutions. Instrument-making*, 62, 4, 346-354. (2019) – DOI 10.17586/0021-3454-2019-62-4-346-354
9. Z. M. Gizatullin, R. M. Gizatullin, M. G. Nuriev *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus*, 120-123 (2020)
10. A. S. Katasev, D. V. Kataseva, A. A. Sibgatullin, G. L. Degtyarev, *Herald of Technological University*, 27, 12, 130-135. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_12_130 (2024)
11. Z. M. Gizatullin, R. M. Gizatullin, M. G. Nuriev *Radio engineering and electronics*, 66, 6, 609-613 (2021)
12. E. K. Samygina, L. N. Rassudov, A. P. Balkova, *Herald of the Moscow Energy Institute. Bulletin of MPEI*, 2, 57-64 (2019) - DOI 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64.
13. A.V. Kalyashina., *Herald of Technological University*. I, 27, 12, 147-152 (2024) 10.55421/1998-7072_2024_27_12_147
14. A.V. Kalyashina, Yu.N. Smirnov *Herald of Technological University*, 27, 6, 84-89 (2024) – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_6_84
15. A.V. Kalyashina, T.S. Evdokimova, Yu.N. Smirnov, *Herald of MSTU "Stankin"*, 63, 4, 64-69. (2022).
16. T.R. Kuznetsova, T.A. Akimenko, *Herald of Tula State University. Technical sciences*, 2, 344-348 (2021) - DOI 10.24412/2071-6168-2021-2-344-348.

© **А. В. Каляшина** – канд. техн. наук, доцент кафедры Лазерных и аддитивных технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия, anna_vik@mail.ru; **В. Б. Есов** – канд. техн. наук, доцент кафедры Технологии обработки материалов, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия, esov@bmstu.ru.

© **A. V. Kalyashina** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russia, anna_vik@mail.ru; **V. B. Esov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Materials Processing Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, esov@bmstu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 26.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 01.10.25.