

А. В. Каляшина, Ю. Н. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СЕРВОПРИВОДА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Ключевые слова: математическая модель, пропорциональное регулирование, передаточная функция, сервопривод.

Данное исследование посвящено разработке математической модели и подбора регулятора для сервопривода робота. Сервоприводы активно применяются в сварочных и сборочных роботах для регулирования параметров движения выходного звена робота. Сервопривод имеет в своем составе двигатель постоянного тока с редуктором, датчики обратной связи для контроля угла поворота, а также блок питания и конвертер. В процессе лазерной сварки обычно контролируются: мощность излучения, фокусное расстояние оптической системы, а также скорость сканирования, которая связана с частотой вращения вала двигателя. В качестве объекта регулирования выбран основной элемент сервопривода - двигатель постоянного тока, математическая модель которого основана на уравнениях электрического и механического равновесия. В качестве регулируемого выходного параметра выбрана угловая скорость вращения вала двигателя. Задача исследования – обеспечение регулирования углового положения выходного звена двигателя – вала редуктора. Требуемые показатели качества процесса выбраны для процесса лазерной сварки металлов толщиной от 0,1 до 10 мм: время регулирования не более 1 секунды, вид полученного процесса – монотонный, без колебаний. Автоматическое регулирование сервопривода основано на принципе подчиненного регулирования, в котором последовательно включаются контуры регулирования момента, скорости вращения и углового перемещения вала двигателя. В качестве регулятора в сервоприводах могут быть использованы различные принципы: пропорциональное, интегральное, дифференциальное регулирование. Все они имеют свои достоинства и недостатки. В данной работе проведено исследование пропорционального регулятора, выполнен подбор коэффициентов и оценка их влияния на форму и качество переходного процесса. Для решения задачи составлена структурная схема и определены передаточные функции двигателя постоянного тока, регуляторов положения, скорости и момента, а также передаточные функции датчиков обратной связи. Для исследования выбрана среда математического моделирования Matlab. Для оценки устойчивости и качества переходного процесса получены соответствующие зависимости, подбор коэффициентов регуляторов был произведен экспериментально. Комбинируя коэффициенты передачи регулятора, авторы добились монотонности протекания переходного процесса и необходимого быстродействия. Исследование проводилось в два этапа: на первом этапе не учитывалось внешнее возмущение, на втором этапе было использовано внешнее воздействие эквивалентное крутящему моменту сопротивления, которое имитирует скачки напряжения на обмотках двигателя. Пропорциональный регулятор не устраняет статическую ошибку, но за счет подбора коэффициентов можно добиться вполне приемлемых результатов

A. V. Kalyashina, Yu. N. Smirnov

STUDY OF PROPORTIONAL CONTROL PROCESS OF INDUSTRIAL ROBOT SERVO DRIVE

Keywords: mathematical model, proportional control, transfer function, servo drive.

This study is devoted to the development of a mathematical model and selection of a controller for a robot servo drive. Servos are widely used in welding and assembly robots to regulate the parameters of motion of the robot output link. The servo drive includes a DC motor with a reducer, feedback sensors to control the rotation angle, as well as a power supply and a converter. In the process of laser welding, the following are usually controlled: radiation power, focal length of the optical system, as well as the scanning speed, which is associated with the rotation frequency of the motor shaft. The main element of the servo drive, a DC motor, the mathematical model of which is based on the equations of electrical and mechanical equilibrium, is selected as the object of regulation. The angular velocity of the motor shaft is selected as the regulated output parameter. The task of the study is to ensure regulation of the angular position of the motor output link - the reducer shaft. The required quality indicators of the process are selected for the process of laser welding of metals with a thickness of 0.1 to 10 mm: the regulation time is no more than 1 second, the type of the resulting process is monotonous, without oscillations. Automatic control of the servo drive is based on the principle of subordinate control, in which the control loops of the torque, rotation speed and angular displacement of the motor shaft are sequentially switched on. Various principles can be used as a regulator in servo drives: proportional, integral, differential control. All of them have their advantages and disadvantages. In this paper, a study of a proportional regulator is carried out, the selection of coefficients and an assessment of their influence on the shape and quality of the transient process are performed. To solve the problem, a structural diagram is compiled and the transfer functions of the DC motor, position, speed and torque regulators, as well as the transfer functions of the feedback sensors are determined. The Matlab mathematical modeling environment is selected for the study. To assess the stability and quality of the transient process, the corresponding dependencies are obtained, the selection of regulator coefficients is made experimentally. By combining the regulator transfer coefficients, the authors achieved monotony of the transient process and the required response time. The study was conducted in two stages: at the first stage, external disturbance was not taken into account, at the second stage, an external effect equivalent to the torque of resistance was used, which simulates voltage surges on the motor windings. The proportional controller does not eliminate the static error, but by selecting the coefficients, quite acceptable results can be achieved

Введение

Под робототехническим комплексом обычно понимают передачу одного производственного процесса под контроль промышленному роботу под управлением системы автоматического регулирования [1]. Ещё со времён Генри Форда стало ясно, что для ускорения производства и удешевления продукции необходимо разделить общий процесс на множество небольших простых процессов и путём конвейерного производства выполнять эти процессы по очереди передавая заготовки из одного отдела в другой, в современной действительности эти единичные процессы как раз может выполнять промышленный робот [2].

На сегодняшний день для лазерной сварки используют роботы-манипуляторы с 4-6 степенями свободы, которые за счет использования системы регулирования параметров позволяют автоматизировать технологический процесс. Автоматизация сварочного процесса означает перевод сварочного оборудования на автоматический режим работы, внедрение автоматических регуляторов, которые реализуются программно – в контроллере. В современных моделях сварочных роботов на каждую подвижную ось установлены сервоприводы, которые имеют в своем составе двигатель постоянного тока с редуктором, датчики обратной связи (положения, скорости, усилия), для контроля угла поворота, а также блок питания и конвертер. [1,2].

Для полной автоматизации сварочного процесса необходимо оборудовать сварочный робототехнический комплекс системой слежения за линией стыка, средствами регистрации и контроля параметров режима (датчики обратной связи). В задачи оператора входят вспомогательные процессы, например – предварительная настройка параметров технологического процесса и оборудования и визуальный контроль.

К основным законам регулирования относятся:

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

Промышленность выпускает различные типы регуляторов: П, ПИ, ПИД. Все они используются в сервоприводах. Необходимо отметить, что П-регулятор является статическим, следовательно, он не может полностью устранить статическую ошибку, но за счет подбора коэффициентов можно получить вполне приемлемое качество переходного процесса. ПИ-регулятор является астатическим, он повышает точность регулирования (устраняет статическую ошибку, но вместе с тем ухудшает условие устойчивости – переходный процесс становится колебательным [3].

В данной статье приведены результаты исследования двигателя постоянного тока, входящего в состав сервопривода роботизированного комплекса лазерной сварки. Для контроля процесса лазерной сварки обычно применяются следующие параметры [4,5]:

- мощность излучения лазера,
- фокусное расстояние оптической системы,

- расстояние между фокусом излучения и поверхностью свариваемых материалов,
- скорость сканирования.

Скорость сканирования влияет на время взаимодействия лазерного излучения с материалом на одном участке [5]. Уменьшая скорость, можно увеличить зону термического воздействия. И наоборот, при увеличении скорости зона термического воздействия уменьшается. Но надо понимать, что чем больше скорость, тем больше мощности необходимо, чтобы материал успел проплавиться за небольшое время.

В статье представлен результат подбора регулятора для обеспечения скорости сканирования, которая связана с угловой скоростью вращения вала двигателя

Объект исследования – двигатель постоянного тока с редуктором промышленного сварочного робота Fanuc ARC.

Регулируемый параметр – угловая скорость вращения вала двигателя.

Задача исследования – обеспечение регулирования углового положения выходного звена двигателя постоянного тока – вала редуктора.

Требуемые показатели качества процесса регулирования скорости лазерной сварки металлов толщиной от 0,1 до 10 мм [2]: время регулирования не более 1 секунды, вид полученного процесса – без колебаний [6].

В системе автоматического регулирования сервоприводом как правило выделяются контуры обратной связи для контроля момента, скорости вращения вала и перемещения. При такой компоновке реализуется система подчиненного регулирования [3, 7].

Для составления математической модели двигателя постоянного тока использованы уравнения электрического и механического равновесия [4]. Задача редуктора - обеспечение выходной величины скорости вращения вала привода.

Уравнения математической модели имеют следующий вид [2,6]:

Уравнение электрического равновесия:

$$U = rI + L \frac{dI}{dt} + E$$

ЭДС вращения якоря:

$$E = K_e \Phi \omega$$

Момент вращения, создаваемый двигателем:

$$M = K_M \Phi I$$

Уравнение механического равновесия:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

Здесь r – полное активное сопротивление якорной цепи (Ом); L – полная индуктивность якорной цепи (Гн); Φ – магнитный поток возбуждения двигателя, создаваемый постоянным магнитом (Вб); M – момент вращения, создаваемый двигателем; M_c – момент статического сопротивления нагрузки, приведённый к валу двигателя (Н·м); J – момент инерции привода, включающий моменты инерции двигателя и нагрузки, приведённый к валу двигателя (кг·м²); $K_e = \frac{pN}{a60}$ и $K_M = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивные постоянные

двигателя, где p число пар полюсов двигателя [7,8], N – число активных проводников якоря (равно удвоенному числу витков обмотки якоря), a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря [3,8].

Используя прямое преобразование Лапласа уравнений электрического и механического равновесий были получены передаточные функции двигателя:

$$W_{д1} = \frac{M(p)}{U(p) - 0,105 \cdot K_d \omega(p)} = \frac{K_d / r}{T_я p + 1}$$

$$W_{д2} = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{K_d^2 r}{T_m p}$$

где $K_d = K_M \Phi$, $T_я = \frac{L}{r}$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$T_m = JrK_d^2$ – электрохимическая постоянная времени

Общая структурная схема системы автоматического регулирования сервопривода включает: схему двигателя постоянного тока, регуляторы, а также контуры обратной связи [4]. Общая структурная схема системы представлена на рис 1.

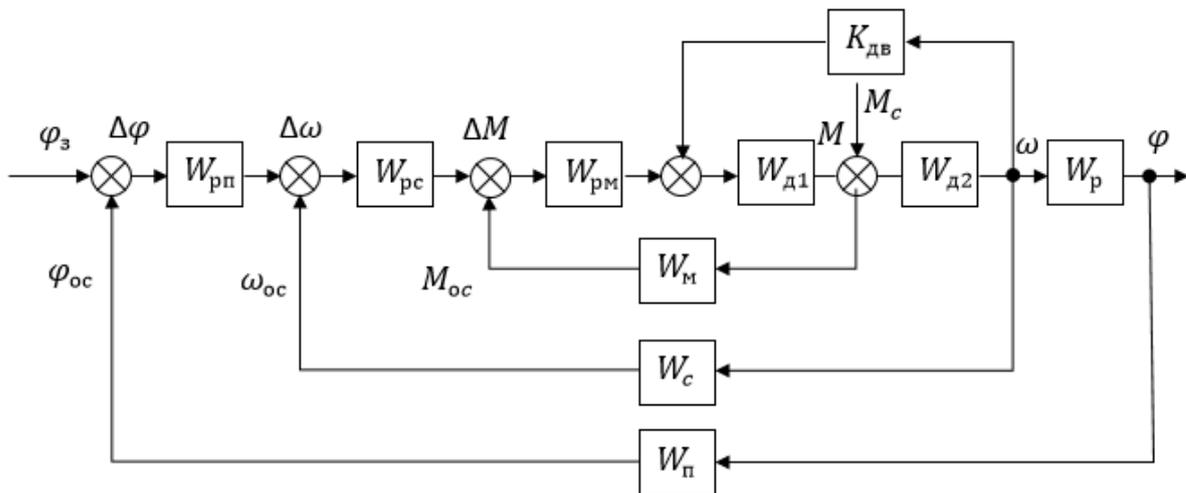


Рис. 1 - Обобщенная структурная схема сервопривода
Fig. 1 - Generalized structural diagram of the servo drive

На рисунке 1 представлены:

- $W_{рп}, W_{рс}, W_{рм}$ – передаточные функции регуляторов положения, скорости и момента;
- W_m, W_c, W_p – передаточные функции датчиков момента, угловой скорости и углового перемещения;
- $K_{дв}$ – коэффициент передачи обратной связи двигателя;
- $W_{д1}, W_{д2}$ и W_p – передаточные функции двигателя и редуктора.

Датчики момента W_m , угловой скорости W_c и углового перемещения W_p примем с единичными коэффициентами передачи [9];

В качестве сигналов обозначены:

- φ_z – задающее воздействие углового перемещения,
- $\varphi_{ос}$ – сигнал обратной связи контура перемещения,
- $\omega_{ос}$ – сигнал обратной связи контура скорости,
- $M_{ос}$ – сигнал обратной связи контура момента,
- $\Delta\varphi$ – ошибка регулирования углового положения,
- $\Delta\omega$ – ошибка регулирования угловой скорости,
- ΔM – ошибка регулирования момента

В ходе экспериментального исследования контур обратной связи, связанной с моментом был заменен одной передаточной функцией и объединен с передаточной функцией $W_{рм}$ [10,11]. Таким образом в системе осталось два регулятора – регулятор положения $W_{рп}$ и регулятор скорости $W_{рс}$.

Исследование проводилось для двух случаев:

- 1) оба регулятора являются пропорциональными звеньями (П-регулирование),
- 2) В оба регулятора был добавлен интегратор (ПИ-регулирование)

В данной статье приведены результаты исследование когда оба регулятора являются пропорциональными звеньями.

Задача: исследовать систему с П-регуляторами в обоих контурах, провести оценку влияния коэффициентов регуляторов на устойчивость и переходный процесс. Исследовать систему с учетом внешнего возмущающего фактора – момента нагрузки на двигатель

Заданы следующие требования [12]:

- быстродействие не более 1 секунды,
- переходный процесс не колебательный
- входной сигнал – перемещение на 1 радиан

Исследование проводилось в два этапа – без учета и с учетом внешнего возмущающего воздействия. В качестве программной среды выбран MatLab

1 этап. Исследование системы с пропорциональными регуляторами в контурах положения и скорости без учета внешнего возмущения (рис. 2).

Коэффициенты регулятора положения и скорости изменялись в пределах от 1 до 50. Приведем некоторые результаты:

$P_{\Pi} = 1; P_C = 1 \Rightarrow$ время регулирования $t_p = 24,9$ секунды - переходный процесс монотонный

$P_{\Pi} = 5; P_C = 1 \Rightarrow$ время регулирования $t_p = 30,8$ секунды – переходный процесс колебательный (за счет увеличения коэффициента регулятора положения)

$P_{\Pi} = 1; P_C = 5 \Rightarrow$ время регулирования $t_p = 36,9$ секунды – переходный процесс монотонный, но время регулирования значительно увеличилось (за счет увеличения коэффициента регулятора скорости).

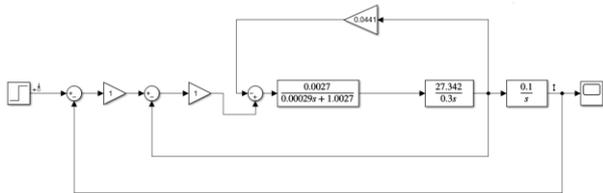


Рис. 2 - Структурная схема сервопривода с коэффициентами пропорциональных регуляторов

Fig. 2 - Structural diagram of a servo drive with proportional controller coefficients

Комбинируя коэффициенты передачи пропорциональных регуляторов можно добиться монотонности переходного процесса и необходимого быстродействия. Результаты исследования – время регулирования t_p , перерегулирование σ , запасы устойчивости по амплитуде ΔL и по фазе $\Delta \varphi$ представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты подбора коэффициентов регулятора

Table 1 - Results of selection of regulator coefficients

Параметры регуляторов	Переходный процесс	Устойчивость
$P_{\Pi} = 1;$ $P_C = 1$	Монотонный $t_p = 24,9$ с $\sigma = 1,15\%$	Система устойчива $\Delta L = 91,2$ дБ $\Delta \varphi = 70,6^\circ$
$P_{\Pi} = 5;$ $P_C = 1$	Колебательный $t_p = 30,8$ с $\sigma = 29,1\%$	Система устойчива $\Delta L = 77,2$ дБ $\Delta \varphi = 39,9^\circ$
$P_{\Pi} = 1;$ $P_C = 5$	Монотонный $t_p = 36,9$ с	Система устойчива $\Delta L = 90,9$ дБ $\Delta \varphi = 85,4^\circ$
$P_{\Pi} = 30;$ $P_C = 50$	Монотонный $t_p = 0,984$ с	Система устойчива $\Delta L = 61,2$ дБ $\Delta \varphi = 76,6^\circ$

Как видно из таблицы при определенном сочетании коэффициентов в системе могут появиться колебания. Хотя при этом система остается устойчивой, для решения данной задачи колебания неприемлемы, так как они значительно снижают точность работы робота. На появление колебательных процессов оказывает влияние

коэффициент передачи П-регулятора в контуре положения [13]. Увеличение коэффициента передачи в контуре скорости не оказывает влияния на появление колебаний. Комбинируя коэффициенты П-регуляторов можно значительно уменьшить время регулирования переходного процесса при этом сохраняя устойчивость системы.

В литературе описаны различные методики подбора коэффициентов регуляторов [14,15]:

1) Метод Дудникова Е.Г. Даёт оценку запаса устойчивости по распределению корней характеристического уравнения.

2) Метод Ротаца В. Я. Даёт оценку запаса устойчивости систем управления по частотным характеристикам, с учетом заданного показателя колебательности.

3) Метод определения настроек разных типов регуляторов по номограммам.

4) Метод масштабирования.

В рамках данного исследования коэффициенты подбирались экспериментально.

Оптимальный результат был получен при сочетании коэффициентов $P_{\Pi} = 30; P_C = 50$. Вид переходного процесса представлен на рис. 3

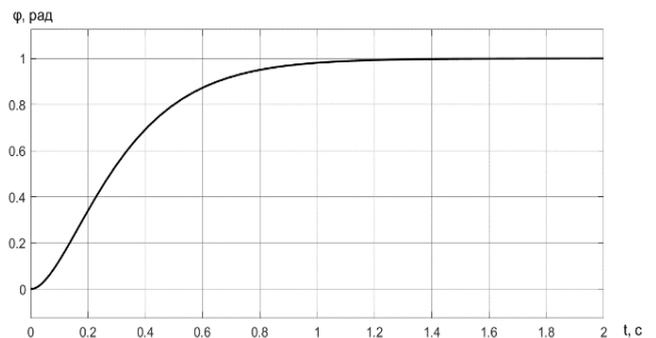


Рис. 3 - График переходного процесса

Fig. 3 - Transition process schedule

Из графика видно, что время переходного процесса составило примерно 0.984 секунды, что близко к требуемому значению (1 секунда)

2 этап. Исследование системы с пропорциональными регуляторами в контурах положения и скорости с учетом внешнего воздействия (рис. 4).

В ходе моделирования было использовано внешнее воздействие эквивалентное крутящему моменту сопротивления, которое имитирует, например, скачки напряжения на обмотках или износ двигателя, при котором повышается сила трения. Если в системе используются только П-регуляторы, то при появлении внешнего возмущения будет присутствовать статическая ошибка, которая будет расти с ростом возмущения.

Внешнее воздействие изменяли в пределах от 0 до 1 Н*м – определяли выходную величину углового перемещения. В табл. 2 представлены результаты влияния внешнего воздействия на величину углового перемещения и статическую ошибку.

Среднее изменение статической ошибки на каждое повышение внешнего воздействия на 0,1 Н*м

составило 0.0248 радиан. Средняя абсолютная погрешность изменения статической ошибки составила 0.00032 радиан. Относительная погрешность 1,3%.

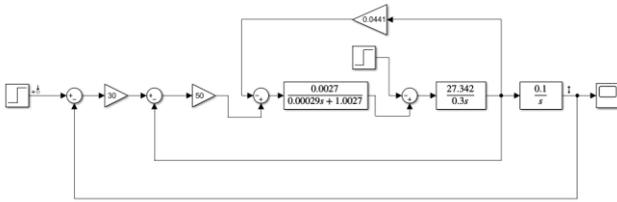


Рис. 4 - Структурная схема сервопривода с учетом внешнего воздействия

Fig. 4 - Structural diagram of the servo drive taking into account external influences

Таблица 2 - Результаты исследования влияния внешнего воздействия

Table 2 - Results of the study on the influence of external influences

Изменение внешнего воздействия Н*м	Величина углового перемещения, рад	Статическая ошибка, рад
0	1	0
0.1	0.975	0,025
0.2	0.95	0,05
0.3	0.926	0,074
0.4	0.901	0,099
0.5	0.876	0,124
0.6	0.851	0,149
0.7	0.827	0,173
0.8	0.802	0,198
0.9	0.777	0,223
1	0.752	0,248

Заключение

В результате данного исследования составлена математическая модель и структурная схема системы регулирования сервопривода сварочного робота на основе двигателя постоянного тока, с использованием уравнений электрического и механического равновесия. 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. В качестве регулятора использованы пропорциональные звенья в контурах положения и скорости. Исследование проводилось в среде MatLab в два этапа: на первом этапе не учитывалось внешнее воздействие, на втором этапе было использовано внешнее воздействие эквивалентное крутящему моменту сопротивления, которое имитирует скачки напряжения на обмотках двигателя.

В результате были подобраны коэффициенты П-регулятора, которые обеспечивают устойчивость переходного процесса (определены запасы устойчивости по фазе и амплитуде), а также определены параметры переходного процесса: время регулирования и перерегулирования.

Основной вывод исследования – пропорциональный регулятор не способен устранить статическую ошибку системы, но изменяя коэффициенты регулятора можно добиться вполне приемлемых результатов: быстроедействие системы с П-регулятором 0,984 секунды, и вид процесса – монотонный без колебаний, что укладывается в заданные параметры.

Литература

1. А.А.Жиленков, Л. Гуаняо, Л. Жуйлэ *Качество и жизнь*, 2 (14), 90-94 (2017) .
2. К. Ю. Котов, А. С. Мальцев, А. А. Нестеров *Автоматрия*, 49, 6, 42-50 (2013).
3. М.П. Белов, Д.Х. Чан, Ч.Х. Фюонг, *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*, 4, 66-72 (2018).
4. М. Г. Нуриев, Е. С. Белашова, К. А. Барабаш *Программные системы и вычислительные методы*, 1, 1-12. (2023).
5. Ю.Н. Смирнов, А.И. Абдуллин, А.В. Каляшина, *Научно-технический вестник Поволжья*. 6, 106-109.(2023).
6. А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин *Мехатроника, автоматизация, управление*, 19, 7, 486-496 (2018) - DOI 10.17587/mau.19.486-496.
7. 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.
8. 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).
9. 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).
10. З. М. Гизатуллин, Р. М. Гизатуллин, М. Г. Нуриев *Радиотехника и электроника*, 66, 6, 609-613 (2021).
11. 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.
12. А.В.Каляшина., *Вестник Технологического университета.а*, 27, 12, 147-152 (2024) 10.55421/1998-7072_2024_27_12_147.
13. А.В. Каляшина, Ю.Н. Смирнов *Вестник Технологического университета*, 27, 6, 84-89 (2024) – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_6_84.
14. А.В. Каляшина, Т.С. Евдокимова, Ю.Н. Смирнов, *Вестник МГТУ "Станкин"*, 63, 4, 64-69. (2022).
15. 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.A.Zhilentov, L.Guanyao, L.Ruiley *Quality and Life*, 2 (14), 90-94 (2017).
2. K. Yu. Kотов, A. S. Maltsev, A. A. Nesterov *Avtometriya*, 49, 6, 42-50 (2013) .
3. М. Р. Belov, D. H. Chan, С. Н. Phuong, *Izvestiya SPbGETU LETI*, 4, 66-72 (2018).

4. M. G. Nuriev, E. S. Belashova, K. A. Barabash *Software systems and computational methods*, 1, 1-12. (2023).
5. Yu.N. Smirnov, A.I. Abdullin, A.V. Kalyashina, *Scientific and Technical Herald of the Volga Region*. 6, 106-109.(2023).
6. A. Yu. Ivoylov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin *Mechatronics, automation, control*, 19, 7, 486-496 (2018) - DOI 10.17587/mau.19.486-496.
7. T. Orłowska-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.
8. Z. M. Gizatullin, R. M. Gizatullin, M. G. Nuriev *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus*, 120-123 (2020).
9. 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).
10. Z. M. Gizatullin, R. M. Gizatullin, M. G. Nuriev *Radio engineering and electronics*, 66, 6, 609-613 (2021).
11. 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.
12. A.V. Kalyashina., *Herald of Technological University*. I, 27, 12, 147-152 (2024) 10.55421/1998-7072_2024_27_12_147.
13. A.V. Kalyashina, Yu.N. Smirnov *Herald of Technological University*, 27, 6, 84-89 (2024) – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_6_84.
14. A.V. Kalyashina, T.S. Evdokimova, Yu.N. Smirnov, *Herald of MSTU "Stankin"*, 63, 4, 64-69. (2022).
15. 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** – кандидат технических наук, доцент кафедры Цифровые системы и модели (ЦСМ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, anna_vik@mail.ru; **Ю. Н. Смирнов** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой ЦСМ, КГЭУ, mmite@mail.ru.

© **A. V. Kalyashina** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Digital Systems and Models (DSM), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia, anna_vik@mail.ru; **Yu. N. Smirnov** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Associate Professor, Head of the of the DSM department, KSPEU, mmite@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 10.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 24.04.25.