

А. В. Каляшина

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА РОССИЙСКОЙ ПЛАТФОРМЕ TRACKDUINO

Ключевые слова: цифровая фильтрация, фильтр Калмана, медианный фильтр, ультразвуковой датчик, инфракрасный датчик, датчик положения.

Данное исследование посвящено сравнительной оценке работы цифровых фильтров для фильтрации сигналов, получаемых с датчиков. Сенсорная информация о местоположении мобильных роботов, объектах внешней среды, включая возможные препятствия, ее общая 3D картина является основой для построения модели окружающего пространства, выбора направления и траектории движения в соответствии с выполняемыми задачами, именно поэтому крайне важно получать качественный сигнал с сенсорного устройства. С инженерной точки зрения имеет смысл классифицировать сенсорные устройства по виду их выходных сигналов. Этот критерий важен для подключения сенсора к контроллеру через интерфейс. Задачей данного исследования было обеспечение траектории движения мобильного робота, передвигающегося в ограниченном пространстве и управляемого системой управления, получающей информацию от сенсорных устройств. Для этого были выполнены следующие этапы: получен устойчивый сигнал от датчиков, с помощью программного обеспечения Arduino IDE получены графики исходных сигналов датчиков, проведена предварительная обработка сигналов (фильтрация), обработанные сигналы переданы в контроллер. В качестве сенсорных устройств были использованы: ультразвуковой датчик для определения дальности препятствий, два инфракрасных датчика для определения границы траектории движения и датчик положения для ориентации робота в пространстве. В рамках данной статьи приведены результаты фильтрации сигналов с использованием фильтра Калмана и медианного фильтра. Для их реализации разработан программный код на языке Си++. В статье рассмотрены основные методы подавления шумов и особенности цифровых фильтров. В результате исследования определены особенности применения нелинейного медианного фильтра и фильтра Калмана.

A. V. Kalyashina

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF SENSOR SIGNAL RECOGNITION AND FILTRATION FOR MOBILE ROBOT MOTION CONTROL ON RUSSIAN PLATFORM TRACKDUINO

Keywords: digital filtering, Kalman filter, median filter, ultrasonic sensor, infrared sensor, position sensor.

This study is devoted to the comparative evaluation of the digital filters for filtering signals received from sensors. Sensory information about the location of mobile robots, environmental objects, including possible obstacles, its overall 3D picture is the basis for constructing a model of the surrounding space, choosing the direction and trajectory of movement in accordance with the tasks performed, which is why it is extremely important to receive a high-quality signal from a sensor device. From an engineering point of view, it makes sense to classify sensor devices by the type of their output signals. This criterion is important for connecting the sensor to the controller via the interface. The objective of this study was to ensure the trajectory of movement of a mobile robot moving in a limited space and controlled by a control system receiving information from sensor devices. For this, the following steps were performed: a stable signal from the sensors was received, graphs of the original sensor signals were obtained using the Arduino IDE software, preliminary signal processing (filtering) was carried out, the processed signals were transmitted to the controller. The following sensor devices were used: an ultrasonic sensor for determining the distance of obstacles, two infrared sensors for determining the boundary of the trajectory of movement, and a position sensor for orienting the robot in space. This article presents the results of signal filtering using the Kalman filter and the median filter. A program code in C++ was developed for their implementation. The article considers the main methods of noise suppression and the features of digital filters. As a result of the study, the features of using a nonlinear median filter and a Kalman filter were determined.

Введение

В мобильной робототехнике используются разнообразные сенсорные устройства, работа которых основана на применении различных измерительных технологий. С инженерной точки зрения имеет смысл классифицировать сенсорные устройства по виду их выходных сигналов. Именно этот критерий важен для подключения сенсора к контроллеру через интерфейс. В таблице 1 приведены типичные выходные данные сенсоров и соответствующие им типовые приложения.

Датчики, используемые в мобильной робототехнике, зависят от поставленной перед

роботом задачи. Например, дальнометры и локаторы – определяют расстояния до объектов, тактильные датчики – фиксируют соприкосновение с объектами внешней среды, используются для осязания рабочих органов манипуляторов и корпуса мобильного робота; для определения положения в пространстве используют гироскопы, акселерометры, магнитометры, инклинометры, одометры, спутниковые системы навигации. Кроме того, могут быть сугубо специальные сенсорные системы, которые применяются для решения специфических задач, например, для выявления особо опасных объектов или процессов [2].

Сенсорная информация о местоположении мобильных роботов, объектах внешней среды, включая возможные препятствия, ее общая 3D картина является основой для построения модели окружающего пространства, выбора направления и траектории движения в соответствии с выполняемыми задачами [1, 2].

Таблица 1 – Выходные сигналы сенсоров

Table 1 – Sensor output signals

Выходной сигнал сенсора	Типовое приложение
Двоичный сигнал (0 или 1)	Тактильный датчик
Аналоговый сигнал	Инклинометр
Синхросигнал (ШИМ)	Гироскоп
Последовательный канал (RS232 или USB)	GPS-модуль
Параллельный канал	Цифровая камера

Описание процесса исследования

Задача данного исследования – обеспечить траекторию движения мобильного робота, передвигающегося по складу и управляемого сигналами с сенсорных устройств. Данная задача включает три подзадачи:

- 1) получение сигналов от датчиков и их предварительная обработка (нижний уровень аппаратной логики);
- 2) передача готового сигнала на уровень контроллера;
- 3) использование сигналов для управления движением

Для решения поставленной задачи использован гусеничный робот на платформе TracKDuino. Данный мобильный робот имеет двухуровневую систему управления (нижний и верхний уровень), схема автоматизированной системы управления (АСУ) представлена на рис. 1.

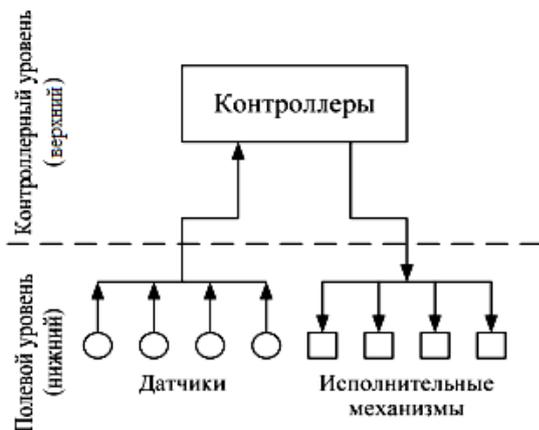


Рис. 1 – Двухуровневая система управления

Fig. 1 – Two-level control system

Нижний уровень АСУ представлен контрольно-измерительными приборами и исполнительными устройствами [3].

Верхний уровень реализован на базе программируемого контроллера, задача которого – формировать команды управления в соответствии с алгоритмом. Передача данных от датчика к контроллеру может происходить как по инициативе контроллера (опрашивание), так и по инициативе датчика (через прерывания) [4]. В первом случае контроллер должен постоянно проверять, готов ли датчик к передаче данных, считывая в цикле статус датчика. Такая технология требует больших затрат времени в сравнении с альтернативной технологией – передачей данных по инициативе датчика, для которой необходим свободный канал прерывания. Посредством прерывания датчик сигнализирует о готовности передачи данных, и контроллер немедленно реагирует на запрос.

В качестве сенсорных устройств были использованы:

- ультразвуковой датчик модели HC-SR04 – определяет дальность до препятствий;
- два инфракрасных датчика – определяют границы траектории движения;
- датчик положения (акселерометр и гироскоп) – определяет положение в пространстве.

В контроллере оценивается достоверность цифрового сигнала и проводится цифровая фильтрация. Контроллер подключен к ЭВМ через USB-порт, по которому происходит загрузка фильтра. После фильтрации сигнал еще раз проверяется на достоверность и передается на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), где уже обработанный сигнал преобразуется в аналоговый вид и поступает на исполнительные механизмы.

В процессе исследования были выполнены следующие процедуры:

- подключение сенсора к контроллеру;
- разработка алгоритма преобразования аналогового сигнала в цифровой (на языке Си++);
- получение сигнала с контроллера, подключенного к компьютеру через последовательный порт;
- преобразование выборки значений сигналов в графический формат;
- выбор и применение оптимального цифрового фильтра.

В качестве объектов исследования выбраны три типа датчиков:

- инфракрасный датчик;
- ультразвуковой датчик HC-SR04;
- датчик положения (совмещенный акселерометр и гироскоп) GY-521.

Инфракрасный датчик позволяет определить условное расстояние до хорошо отражающих свет поверхностей. Расчет расстояния от светодиода до фотодиода проводится по формуле [3,6]:

$$l = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta},$$

где l – расстояние от светодиода до фотодиода; d – расстояние от светоотражающей поверхности до диодов; α и β – углы при диодах.

Ультразвуковой датчик работает на основе принципа эхолокации – посылая пучок ультразвука, и получая его отражение с задержкой, устройство

определяет наличие объектов и расстояние до них, тем самым давая возможность вовремя среагировать на сигнал и подать команду на обход препятствия.

Для вычисления расстояния до объекта необходимо знать скорость распространения звука в воздухе (v) и время между излучением и принятием ультразвуковой волны (t), расчет проводится по следующей формуле [7]:

$$S = \frac{v * t}{2}.$$

Диапазон дальности измерения расстояния обычно составляет от 2 до 300 см. При этом, на функционирование датчика не оказывают существенного влияния внешние помехи, такие как электромагнитные излучения и солнечная энергия.

Инфракрасный и ультразвуковой датчики используют стандартный 3-пиновый разъем и подключается в любой из портов IN контроллера (работает только с входными сигналами) [8].

Ориентацию и позиционирование мобильного робота реализуется с помощью комбинации акселерометра и гироскопа, используя усредненные значения.

Акселерометр – это устройство, измеряющее проекцию кажущегося ускорения на одну или несколько осей, называемых осями чувствительности. При повороте датчика из положения одного положения в другое, когда на ось акселерометра действует сила тяжести, можно измерить угол наклона акселерометра по отношению к этой силе [3, 9]. Измеряемое значение кажущегося ускорения свободного падения будет уменьшаться в соответствии с выражением [3, 10]:

$$F_x = mg \cos \alpha,$$

где α – угол наклона датчика; F_x – проекция вектора ускорения свободного падения на ось чувствительности x

Таким образом, угол наклона можно найти:

$$\alpha = \arccos \frac{F_x}{mg}.$$

Гироскоп реагирует на изменение угловой скорости на одной или нескольких осях [11,12].

Датчик положения использует интерфейс I²C и подключается к любому из двух соответствующих портов контроллера [11,12].

Цифровая обработка сигналов

Цифровая обработка сигналов – это метод обработки информации, основанный на определенной последовательности с установленным периодом дискретизации. [3,13]

Одна из основных задач обработки сигналов – устранение помех и шумов. Эта задача достаточно легко решается только в случае избыточного входного сигнала с детерминированными параметрами. Цифровую систему, предназначенную для преобразования и обработки дискретных сигналов, называют цифровым фильтром.

Любой измерительный прибор (датчик) обладает некоторой погрешностью, так как на него оказывают влияние внутренние и внешние воздействия, что приводит к искажению полученного сигнала шумовыми составляющими.

Рассмотрим основные методы подавления шумов.

Метод медианного сглаживания [7, 14] – эффективно убирает выбросы в данных, но потенциально меняет площадь и высоту пика.

Метод скользящего среднего является самым простым -вычисляется среднее, которое считается сглаженным значением в центральной точке. Вместо простого среднего можно использовать взвешенное среднее [7].

Метод Савицкого-Голея основан на применении численного метода наименьших квадратов. [7,15]. Значение полинома определяется за счет весовых коэффициентов точек, положительных в центре окна фильтрации и отрицательных по краям. Предварительно вычисляется взвешенное среднее значение весовых коэффициентов.

Фильтр Калмана ориентирован на фильтрацию значения в последней (по времени) из измеренных точек и использует при формировании нового значения предыдущий результат фильтрации (рекурсивность) [4,5]. Если взять простой вариант фильтра Калмана то суммарное значение сигнала после фильтрации представляет сумму последнего измеренного параметра и предыдущего сглаженного. Постоянные коэффициенты не зависят от времени. Альтернативное название этого метода - экспоненциальное сглаживание [16]. Необходимо учитывать несимметричность фильтра Калмана так как он учитывает точки, полученные ранее анализируемой, при этом более поздние значения не берутся в расчет [7].

В таблице 2 представлены особенности цифровых фильтров

В данном исследовании применялись два фильтра – Калмана и медианный. Применение методов обработки исходного сигнала повышает требования к аппаратной части изделия по причине более высокой вычислительной сложности, что было признано нецелесообразным в условиях настоящей задачи

Метод медианной фильтрации, широко применяется для ослабления воздействия смешанных помех и обеспечивает большую устойчивость оценки полезного сигнала при возникновении одиночных экстремальных значений [7]. Выходной сигнал y_k медианного фильтра шириной $2n + 1$ для текущего отсчета k формируется из входной последовательности (x_{k-1}, x_k, x_{k+1}) в соответствии с формулой:

$$y_k = \text{med}(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}, x_{k+n}).$$

Элементы ранжированы по порядку возрастания.

Работа линейного фильтра Калмана основана на рекуррентной формуле, учитывающей среднеквадратичное отклонение ошибки, дисперсию ошибки сенсора и дисперсию ошибки координаты.

Реализация фильтра Калмана основана на рекуррентной формуле [7]:

$$x_{k+1}^{opt} = K * z_{k+1} + (1 - K)(x_k^{opt} + u_k),$$

где x_{k+1}^{opt} – отфильтрованное значение на данном шаге; z_{k+1} – значение выхода сенсора; u_k – скорость обмена данными; K – коэффициент Калмана, который определяется:

$$K = \frac{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2}{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2}$$

где E – среднеквадратичное отклонение от квадрата ошибки e_k ; σ_ξ – дисперсия ошибки сенсора; σ_η – дисперсия ошибки координаты.

Таблица 2 – Особенности цифровых фильтров

Table 2 – Features of digital filters

Фильтр	Особенности фильтра
Медианный фильтр	- простая структура - не изменяет ступенчатые и пилообразные функции; - хорошо подавляет одиночные импульсные помехи и случайные шумовые выбросы
Фильтр скользящая средняя	- фильтр дает функцию тренда, в наибольшей мере приближенную к значениям исследуемого ряда; - к исследуемому ряду можно добавить новые значения; - нахождение тренда не требует серьезных вычислительных ресурсов
Фильтр Савицкого Голя	- плоскость частотной характеристики в полосе пропускания; - умеренное затухание в полосе подавления; - нулевой сдвиг фаз.
Фильтр Калмана	- средний квадрат ошибки фильтра минимален; - получение оптимальных, непрерывно обновляемых оценок положения и скорости некоторого объекта по результатам временного ряда неточных измерений его местоположения; - использует вероятностную модель динамики цели, задающую тип вероятного движения объекта
Преобразование Фурье	- выдает простые для расчетов формулы и прозрачную интерпретацию результатов; - позволяет получать такие характеристики сигнала, как среднеквадратичное значение вибрации на исследуемых диапазонах частот, оценки параметров вибрации на кратных частотах и другие; - применяется для анализа спектра диагностируемого объекта
Вейвлет фильтрация	- высокая эффективность на основе вейвлет-преобразования; - возможность автоматической настройки параметров; - выдает низкочастотные и высокочастотные характеристики сигнала

Платой-микроконтроллером выступает плата Trackduino, разработанная российской компанией Robotrack. Она является полной копией платформы Arduino Uno как на аппаратном, так и на программном уровнях (языком программирования выступает оптимизированная под архитектуру

версия языка C++). Центральным процессором на данной плате является чип ATmega2560 [10].

Принцип обработки сигнала ИК-датчика заключается в обнаружении «эха» сигнала, полученного через ИК-приёмник. На результат работы датчика оказывает влияние материал препятствия, который влияет на коэффициент отражения сигнала. В связи с этим дальность обнаружения объектов может изменяться. [9,16]

Проведем для данного датчика фильтрацию, так как на ИК-приёмнике постоянно присутствуют шумы, вызванные внешним освещением.

С помощью программного обеспечения Arduino IDE получен график исходного сигнала инфракрасного датчика.

На рис.2 представлен фрагмент программного кода для реализации фильтра Калмана

```

1 float errmeasure = 40; // разброс измерения
2 float errestimate = 40; // разброс оценки
3 float q = 0.5; // скорость изменения значений
4 float currentestimate = 0.0;
5 float lastestimate = 0.0;
6 float kalmangain = 0.0;
7
8 void setup() {
9     Serial.begin(9600);
10 }
11
12 void loop() {
13     byte value = analogRead(A7);
14     Serial.print("X ");
15     Serial.print(value);
16     Serial.print(" Filtered ");
17     byte filtered = filter(value);
18     Serial.println(filtered);
19     delay(200);
20 }
21 // функция фильтрации
22 byte filter(byte value) {

```

Рис. 2 – Фрагмент программного кода

Fig. 2 – Fragment of program code

Значения параметров, необходимые для работы с функцией фильтрации записываются в переменные, добавленные в начале программы. Отфильтрованный сигнал записывается в переменную filtered как результат выполнения функции filter

На рис.5 представлен результат фильтрации инфракрасного датчика с использованием фильтра Калмана, как видно из рисунка кривая отфильтрованного сигнала более интерполирована, т.е. не содержит сильных скачков значений полученной выборки. На рисунке синий цвет отражает исходный сигнал, а красный – сигнал после фильтрации.

Фрагмент программного кода для медианного фильтра представлен на рис. 6.

На рис. 7 показан результат фильтрации сигнала инфракрасного датчика с использованием медианного фильтра, исходный сигнал изображен синим цветом, отфильтрованный сигнал изображен красным.

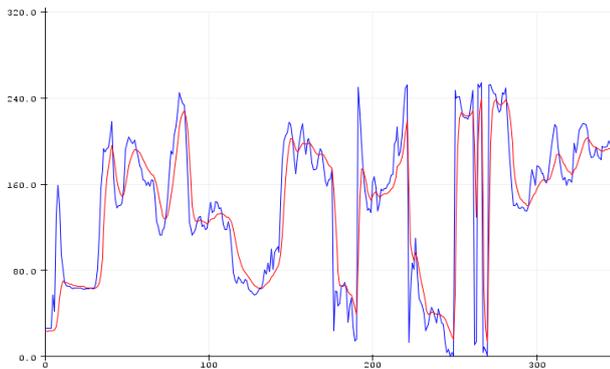


Рис. 3 – Результат фильтрации сигнала с инфракрасного датчика (фильтр Калмана)

Fig. 3 – Result of filtering the signal from the infrared sensor (Kalman filter)

```

21 // медианный фильтр из 3ёх значений
22 int middle_of_3(int a, int b, int c) {
23     int middle;
24     if ((a <= b) && (a <= c)) {
25         middle = (b <= c) ? b : c;
26     }
27     else {
28         if ((b <= a) && (b <= c)) {
29             middle = (a <= c) ? a : c;
30         }
31         else {
32             middle = (a <= b) ? a : b;
33         }
34     }
35     return middle;
36 }

```

Рис. 4 – Фрагмент программного кода

Fig. 4 – Fragment of program code

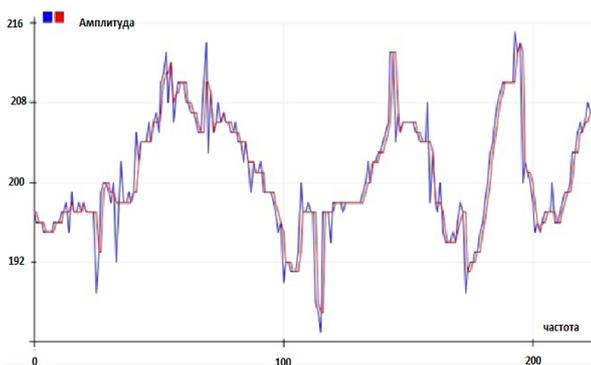


Рис. 5 – Результат фильтрации сигнала с инфракрасного датчика (медианный фильтр)

Fig. 5 – Result of filtering the signal from the infrared sensor (median filter)

Анализируя данные рисунков 3 и 5 делаем вывод, что для инфракрасного датчика более оптимальным оказался фильтр Калмана, который довольно эффективно гасит реальные шумы сигнала.

Выходной сигнал ультразвукового датчика имеет ряд недостатков: значительные погрешности измерения, связанные с видом препятствия,

многократное отражение сигнала от препятствия, шумовые составляющие, импульсные помехи [7, 12].

Исходный сигнал датчика положения также имеет значительные шумы и ярко выраженную пилообразность сигналов. В ходе исследования были выявлены пять критических параметров, влияющих на точность воспроизведения сигнала:

1) случайный дрейф выходного сигнала. Датчик положения создает дополнительный шум, в результате которого в выходном сигнале возникают дополнительные погрешности.

2) Ошибка смещения нулевого положения гироскопа (влияние температуры и вибрации).

3) Нестабильность смещения (влияние длительности работы датчика).

4) Чувствительность к температуре. Производительность датчика положения меняется в зависимости от перепадов температуры, а также от её величины. При нагреве или охлаждении меняются физические свойства веществ, что вносит свои коррективы в точностные характеристики;

5) Чувствительность к ударам и вибрации.

В процессе исследования также была проведена программная фильтрация сигналов ультразвукового датчика и датчика положения. Результаты здесь не приводятся в силу ограниченности объема статьи.

Так как, априорные данные о параметрах исходного сигнала, как правило всегда ограничены, становятся особо значимыми статистические характеристики, которые необходимо принимать во внимание для достижения компромисса между ослаблением смешанного шума и получением гладкой оценки характеристики сигнала. Так как эксперименты проводились на учебном полигоне, было принято решение считать распределение значений сигнала по закону Гаусса

Заключение

По результатам работы сделан вывод о том, что метод медианной фильтрации обеспечил достаточно хорошую устойчивость оценки полезного сигнала при возникновении единичных всплесков амплитуды в выходном сигнале всех видов датчиков. Сигнал после использования медианного фильтра практически не воспринимает кратковременные возмущения. При этом было замечено, что если возникающие помехи имеют отличный от нормального закон распределения, то эффективность медианного фильтра заметно снижается.

Линейный фильтр Калмана существенно снижает шумы, но крайне чувствителен к выбросам. И если заранее не известна информация о статистических характеристиках случайных процессов, влияющих на результат фильтрации, то применение фильтра Калмана может привести к значительным ошибкам.

Литература

1. Н.А. Малев, *Экономика и управление: проблемы, решения*, 7(148), 87-95 (2024).
2. В.А. Жмудь, К.А. Кузнецов, Н.О. Кондратьев *Автоматика и программная инженерия*, 3(25), 9-22, (2018).
3. П.Г. Шурхаленко, *Вопросы науки и образования*, 7(8), 28-31, (2017).

4. Ю.А. Каламбет, Ю. П. Козьмин, А. С. Самохин *Аналитика*, 5(36), 88-101, (2017).
5. Ю.А. Каламбет, *Научное приборостроение*, 29(3), 51-62 (2019).
6. Н. Ю. Алексеев, А. А. Кудрявцев, Г. И. Асмолов, О. П. Лобов *International Journal of Advanced Studies*, 8(3), 9-23, (2018).
7. М. Ю. Сачков, А. Ю. Юсупова *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2, 326-332, (2019).
8. С. А. Ильиных, А. В. Сысалетин, В. А. Ермаков *Вестник НЯЦ РК*, 1, 22-27, (2022).
9. Д. С. Федоров, А. Ю. Ивойлов, В. А. Жмудь, В. Г. Трубин *Автоматика и программная инженерия*, 1(11), 75-80. (2015).
10. Г. П. Снеговский *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*, 4, 98-102, (2014).
11. Ф. И. Кузнецов *Известия ЮФУ. Технические науки*, 11(148), 73-79, (2013).
12. Н. А. Ус, А. А. Авершин *Труды МАИ*, 103, 15-20, (2018).
13. М.П. Базилевский *Вестник Технологического университета*, 27, 4, 97-102 (2024).
14. Ю.А.Каламбет, С. М. Мальцев, Ю.Козьмин, *Аналитика*. 1, 50–55 (2011).
15. П. С. Джумаев, И. А. Иванов, А. В. Иванова *Датчики и системы*, 2(274), 44-49 (2024).
16. А. И. Сабиров, Р. Н. Минниханов, А. С. Катасев, Р. И. Мустафин *Вестник Технологического университета*, 27,1, (2024)
2. V. A. Zhmud, K. A. Kuznetsov, N. O. Kondratiev *Automation and Software Engineering*, 3(25), 9-22, (2018)
3. P.G. Shurkhalenko, *Issues of Science and Education*, 7(8), 28-31, (2017).
4. Yu. A. Kalambet, Yu. P. Kozmin, A. S. Samokhin *Analytics*, 5(36), 88-101, (2017).
5. Yu.A. Kalambet, *Scientific instrumentation*, 29(3), 51-62 (2019).
6. N. Yu. Alekseev, A. A. Kudryavcev, G. I. Asmolov, O. P. Lobov *International Journal of Advanced Studies*, 8(3), 9-23, (2018).
7. M. Yu. Sachkov, A. Yu. Yusupova, *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2, 326-332, (2019).
8. S. A. Ilinykh, A. V. Sysaletin, V. A. Ermakov *Bulletin of the NNC RK*, 1, 22-27, (2022).
9. D. S. Fedorov, A. Yu. Ivoylov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin *Automation and Software Engineering*, 1(11), 75-80. (2015).
10. G. P. Snegovsky *Works of the Rostov State University of Railway Engineering*, 4, 98-102, (2014)
11. F. I. Kuznetsov *News of SFedU. Technical sciences*, 11(148), 73-79, (2013).
12. N. A. Us, A. A. Avershin, *Proceedings of MAI*, 103, 15-20, (2018).
13. M.P. Bazilevsky *Herald of Technological University*, 27, 4, 97-102 (2024).
14. Yu.A. Kalambet, S.M. Maltsev, Yu.Kozmin, *Analytics*. 1, 50–55 (2011).
15. P. S. Dzhumaev, I. A. Ivanov, A. V. Ivanova *Sensors and Systems*, 2(274), 44-49 (2024).
16. A. I. Sabirov, R. N. Minnikhanov, A. S. Katasev, R. I. Mustafin *Herald of Technological University*, 27.1, (2024)

References

1. N.A. Malev, *Economics and Management: Problems, Solutions*, 7(148), 87-95 (2024).

© **А. В. Каляшина** – кандидат технических наук, доцент кафедры Лазерных и аддитивных технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева; доцент кафедры Цифровые системы и модели, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия, anna_vik@mail.ru.

© **A. V. Kalyashina** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Laser Technologies, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Associate Professor of the Department of Digital Systems and Models, Kazan State Energy University, Kazan, Russia, anna_vik@mail.ru.