

Ю. В. Цымай, В. Е. Марлей, А. В. Васин

МОДЕЛЬ ПРОГРАММИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОДВИГАТЕЛЯМИ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ ПЕРИФЕРИЙНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Ключевые слова: программируемая система, управление серводвигателями, аппаратное ограничение, снижение количества компонентов, моделирование траектории движения, интеграция микроконтроллеров.

В данной статье рассматриваются задачи и требования, необходимые для реализации модели программируемой системы управления серводвигателями с ограниченным числом периферийных компонентов. Основная цель состоит в разработке компактного и мобильного исследовательского стенда, способного контролировать скорость вращения серводвигателя в реальном времени. Модель программируемой системы управления серводвигателями с ограниченным числом периферийных компонентов представляет собой подход к созданию высокоэффективных и компактных систем управления движением в промышленных приложениях. Концепция данной модели основывается на интеграции микроконтроллеров и специализированных микросхем для управления двигателями и другими перифериями, что позволяет значительно уменьшить количество используемых компонентов и повысить общую производительность системы. В качестве исполнительного устройства в модели использован небольшой двигатель постоянного тока. Регулирование скорости его вращения осуществляется через широтно-импульсную модуляцию посредством изменения среднего значения напряжения, приложенного к обмоткам двигателя. Объектом управления является платформа с четырьмя серводвигателями. На жидкокристаллический индикатор выводится текущая скорость вращения двигателя, выраженная в оборотах в минуту. Для реализации модели определены технические требования, разработана структурная схема устройства, выполнен подбор элементной базы и расчет потребляемой мощности, описана схема сборки модели устройства, разработан алгоритм и управляющая программа. В процессе тестирования были определены конфликты в работе технических систем и предложены пути повышения общей производительности системы. Создана структурная схема устройства и показан процесс сборки физического макета. Рассмотрен используемый алгоритм управления и продемонстрированы результаты работоспособности модели.

Yu. V. Tsymai, V. E. Marley, A. V. Vasin

A MODEL OF A PROGRAMMABLE SERVO MOTOR CONTROL SYSTEM WITH A LIMITED NUMBER OF PERIPHERAL COMPONENTS

Keywords: programmable system, servo motor control, hardware limitation, reduction of the number of components, motion trajectory modeling, integration of microcontrollers.

This article discusses the tasks and requirements necessary to implement a model of a programmable servo motor control system with a limited number of peripheral components. The main goal is to develop a compact and mobile research bench capable of monitoring the rotation speed of a servo motor in real time. The model of a programmable servo motor control system with a limited number of peripheral components is an approach to creating highly efficient and compact motion control systems in industrial applications. The concept of this model is based on the integration of microcontrollers and specialized chips for controlling motors and other peripherals, which significantly reduces the number of components used and improves the overall performance of the system. A small DC motor is used as an actuator in the model. The speed of its rotation is regulated through pulse width modulation by changing the average value of the voltage applied to the motor windings. The control object is a platform with four servo motors. The liquid crystal display shows the current engine speed, expressed in revolutions per minute. To implement the model, technical requirements are defined, a block diagram of the device is developed, the selection of the element base and calculation of power consumption are performed, the assembly scheme of the device model is described, an algorithm and a control program are developed. During the testing process, conflicts in the operation of technical systems were identified and ways to improve the overall performance of the system were proposed. A block diagram of the device has been created and the process of assembling the physical layout is shown. The control algorithm used is considered and the results of the model's operability are demonstrated.

Введение

Современные промышленные системы управления движением требуют компактности, энергоэффективности и высокой точности, особенно в условиях ограниченного числа периферийных компонентов. Это существенно для робототехники, автоматизированных производственных линий и лабораторных стендов, где критичны минимизация аппаратных затрат и гибкость управления [1,2,4].

Традиционные подходы к управлению серводвигателями часто предполагают использование сложных и дорогостоящих контроллеров, таких как про-

мышленные системы с ЧПУ (числовым программным управлением) или специализированные сервоусилители [1,3]. Однако в последние годы активно развиваются альтернативные решения на базе микроконтроллеров и ШИМ-модуляции (широтно-импульсная модуляция), позволяющие снизить стоимость системы без потери точности [4,5].

Работы, посвящённые управлению сервоприводами, можно разделить на несколько направлений:

1. Использование специализированных контроллеров (например, RoboIntellect Servo Driver на базе PCA9685), обеспечивающих высокую точность,

но требующих дополнительных компонентов для интеграции в систему [6,7].

2. Применение одноплатных компьютеров (Raspberry Pi, Repka Pi) для управления сервомоторами через GPIO и ШИМ, что упрощает программирование, но увеличивает энергопотребление и стоимость [8].

3. Оптимизация схем на базе микроконтроллеров, направленная на сокращение числа периферийных устройств [9].

В отличие от этих подходов, предлагаемая модель сочетает минимализм аппаратной части (микроконтроллер и ШИМ-драйвер) с программной адаптацией под динамические нагрузки, что делает её более универсальной для лабораторных и малобюджетных промышленных решений.

Ключевые отличия данного исследования:

- Снижение стоимости системы за счёт отказа от специализированных сервоусилителей и использования стандартных компонентов (например, драйверов на базе PCA9685) [10].
- Динамическая коррекция ШИМ-сигналов в реальном времени, что позволяет компенсировать задержки в системе управления, описанные в работах по контурным системам ЧПУ [11,12].
- Интеграция обратной связи через датчики углового положения, что решает проблему неконтролируемого изменения скорости, характерную для дешёвых сервоприводов [13].

Целью работы является создание лабораторной модели управления серводвигателями, которая:

- Реализует линейное и угловое перемещение платформы с минимальным набором компонентов.
- Обеспечивает динамическую регулировку скорости через ШИМ с выводом данных на индикатор.
- Позволяет тестировать конфликтные сценарии (например, задержки сигналов) в условиях ограниченной периферии.

Практическое применение модели включает образовательные стенды, прототипирование робототехнических систем и отладку промышленных контуров управления с упором на ресурсоэффективность [14].

Предлагаемая модель вносит вклад в развитие бюджетных и компактных систем управления, сочетая аппаратную минимализацию с алгоритмической адаптацией. Результаты могут быть полезны для инженеров, работающих над оптимизацией периферийных компонентов в сервосистемах.

Подбор компонентов для создания модели

Для реализации модели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить технические требования, предъявляемые к устройству;
- 2) разработать структурную схему устройства;
- 3) выполнить подбор элементной базы;
- 4) выполнить расчет потребляемой мощности;
- 5) описать схему сборки модели устройства;
- 6) разработать алгоритм и управляющую программу.

Модель должна соответствовать определенным требованиям. Необходимо учесть минимальные габариты,

т.к. модель используется как портативный исследовательский стенд. Изменение скорости вращения серводвигателя фиксируется в реальном времени.

В качестве управляющего устройства использована плата Arduino UNO с микроконтроллером ATmega328. На плате реализовано четырнадцать цифровых входов/выходов (шесть из которых можно использовать для генерации ШИМ-сигнала), шесть аналоговых входов. На плате установлен генератор тактовой частоты 16 МГц, USB коннектор, разъем питания, ICSP-разъем, и кнопка reset. Для начала эксплуатации плату достаточно подключить к компьютеру через USB разъем, или запитать через блок питания. Можно так же использовать питание от батареек для мобильности [6,15].

Скорость вращения двигателя постоянно контролируется в рабочем режиме и корректируется путем изменения напряжения питания, подводимого к двигателю. Напряжение питания соответствует 5В с допустимым отклонением $\pm 10\%$. Потребляемый ток не более 100 мА. Потребляемая мощность не более 800мВт. Температура окружающей среды $+15...+30^{\circ}\text{C}$. Влажность окружающей среды 45...60%. Габариты платы 110 x 120мм. Масса не более 500г. Габариты изделия 150 x 150 мм. Максимальное удаление рабочего места от устройства 150 мм [7,15].

Схема электрическая структурная определяет основные функциональные части модели (рис.1). Блок питания обеспечивает питанием всю схему. Arduino UNO обрабатывает и анализирует все поступающие сигналы, после чего производит расчеты и передает необходимые данные на электродвигатель и блок вывода информации.

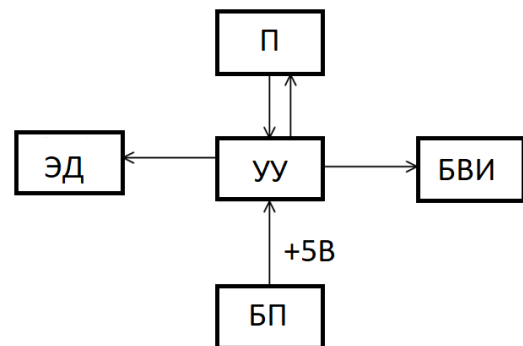


Рис. 1 – Схема электрическая структурная модели программируемой системы управления серводвигателями с ограниченным числом периферийных компонентов: ЭД – электродвигатель, П – потенциометр, БВИ – блок вывода информации, БП – блок питания, УУ – устройство управления

Fig. 1 – Electrical structural diagram of a programmable servo motor control system with a limited number of peripheral components: ED – electric motor, P – potentiometer, BVI – information output unit, BP – power supply unit, CU – control unit

Потенциометр представлен модулем переменного резистора Rotation Sensor V2 L DFR0054 с углом по-

ворота 300 градусов. Блок вывода информации может быть реализован через жидкокристаллический индикатор QC1602A. Электродвигатель F130-13180 имеет максимальное рабочее напряжение 750В, точность работы 5%.

В соответствии с выбранными компонентами определена потребляемая мощность модели по формуле (1):

$$P_{\text{пот}} = U_{\text{пит}} * I_{\text{пот}}, \text{ мВт} \quad (1)$$

где $P_{\text{пот}}$ – потребляемая мощность, $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания, $I_{\text{пот}}$ – ток потребления.

Общая мощность потребления всей схемы вычисляется по формуле (2):

$$P_{\text{общ.сх}} = P_{\text{акт}} + P_{\text{диск}}, \text{ мВт} \quad (2)$$

где $P_{\text{общ.сх}}$ – общая мощность потребления, $P_{\text{акт}}$ – мощность потребления активных элементов, $P_{\text{диск}}$ – мощность потребления дискретных элементов [8].

Мощность дискретных элементов обычно составляет 20% от мощности активных [9]. Результаты Вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета потребляемой мощности

Table 1 – Results of power consumption calculations

№ п/п	Наименование	Количество	$P_{\text{пот}}$, мВт
1	Жидкокристаллический индикатор QC1602A	1	7,5
2	Arduino UNO R3	1	250
3	Электродвигатель F130-13180	1	275
4	Пассивные элементы	20% от активных	106,5
Итого			631,5

Макетирование

Схема сборки дает информацию о последовательности сборки: сборке деталей, способов получения соединения, способов монтажа. Технологическая схема сборки (ТСЗ) определяет последовательность установки деталей и сборочных единиц на базовую деталь. На рисунке 2 приведена схема сборки модели программируемой системы управления серводвигателями с ограниченным числом периферийных компонентов.

На схеме сборки указаны:

- операции получения механических соединений (клепка, клейка, пайка);
- операции электрического монтажа (пайка, накрутка и раскладка проводов).

Печатная плата является базовой деталью. Блоки схемы расположены в порядке соединения и промаркированы (номер, наименование, количество). Слева от вертикальной линии сборки указаны элементы, по другую сторону – операции.

Помимо физического воплощения модели была создана виртуальная модель, позволяющая проверить правильность сборки и в дальнейшем тестировать управляющий код перед окончательной прошивкой в микроконтроллер (рис.3).

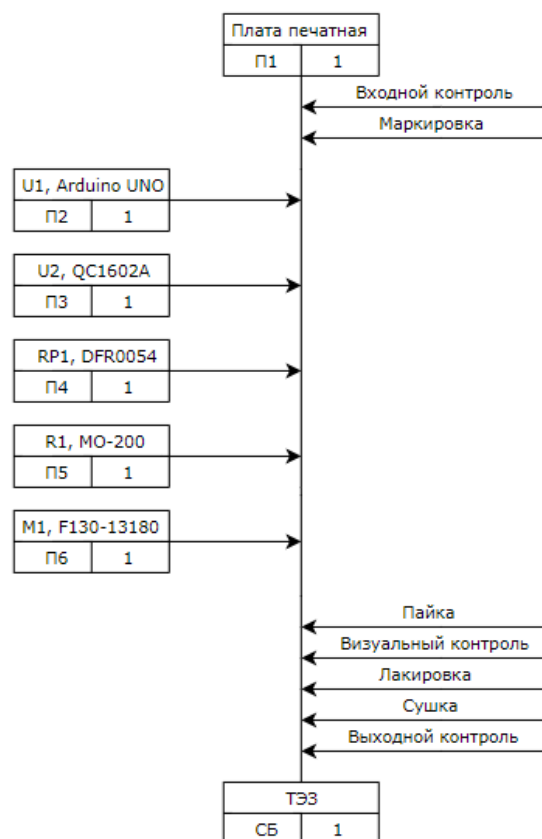


Рис. 2 – Схема сборки модели программируемой системы управления серводвигателями с ограниченным числом периферийных компонентов

Fig. 2 – Assembly diagram of a programmable servo motor control system model with a limited number of peripheral components

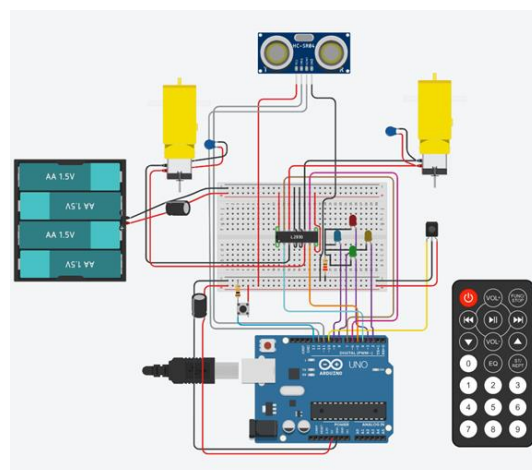


Рис. 3 – Виртуальная модель программируемой системы управления серводвигателями с ограниченным числом периферийных компонентов

Fig. 3 – Virtual model of a programmable servo motor control system with a limited number of peripheral components

Создание и отладка управляющей программы

Алгоритм управляющей программы заключается в следующем:

- 1) Подключение библиотеки `#include <IRremote.hpp>` для приема и декодирования сигналов [10].
- 2) Определение пинов для подключения `const int recvPin = 10`.
- 3) Задание пинов управления двигателями `const int motorA1 (A2, B1, B2)`.
- 4) Задание пинов вывода идентификации сигналов `const int ledForward (ledBackward, ledLeft, ledRight)` [11].
- 5) Задание пинов ультразвукового сенсора `const int ult_TRIG (ECHO)`.
- 6) Задание пинов для подключения кнопки (датчика столкновения) `button`.
- 7) Инициализация инфракрасного приемника и подготовка системы к началу работы.
- 8) Настройка пинов ультразвукового сенсора `pinMode(ult_TRIG, OUTPUT, ult_ECHO, INPUT)`.
- 9) Настройка скорости передачи данных.
- 10) Генерация импульса для ультразвукового сенсора [12].
- 11) Ожидание эхо-сигнала `long duration = pulseIn(ult_ECHO, HIGH)`.
- 12) Расчет расстояния `long distance = duration * 0.0342 / 2`.
- 13) Проверка входных данных, считывание декодированного кода и переводит в .HEX [13].
- 14) Полученные коды вписываются в условном операторе `switch case`, происходит их идентификация [14].
- 15) Выполняется условие: если расстояние до препятствия меньше или равно 10 см, реализуется движение назад на 3 секунды [15].
- 16) Реализация объезда препятствия. На рисунке 4 показан результат идентификации препятствия во время симуляции.

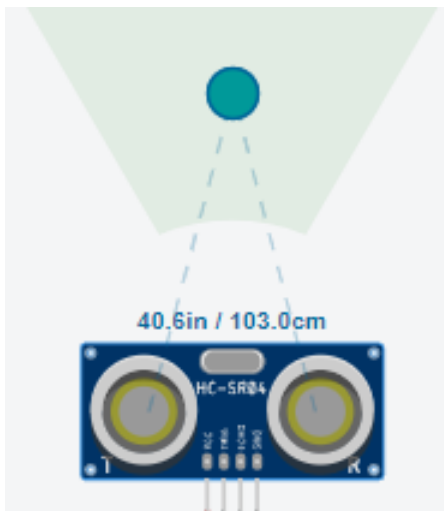


Рис. 4 – Идентификация препятствия во время симуляции

Fig. 4 – Identification of an obstacle during simulation

В основе управляющего алгоритма лежит математическая модель, реализующая минимизацию величины рассогласования между декартовыми координатами целевой точки ($x_{ц}$, $y_{ц}$, $z_{ц}$) и текущим положением перемещаемого объекта (x , y , z).

Поскольку отсутствует внешняя система очувствления, то описание процесса движения через декартовы координаты невозможно, следовательно использованы обобщенные координаты ($q_1, \dots, q_n$) отдельных узлов, которые в каждый момент времени поступают с встроенных датчиков робота и характеризуют положение звеньев относительно друг друга. Но при этом целевая точка задается в абсолютных координатах, поэтому для того чтобы оценить, насколько робот далек от нее, необходимо решить задачу по преобразованию обобщенных координат манипулятора ($q_1, \dots, q_n$) в абсолютные (x, y, z).

Формально решение этой задачи записывается как

$$\begin{aligned} x &= F_x(q_1, \dots, q_n) \\ y &= F_y(q_1, \dots, q_n) \\ z &= F_z(q_1, \dots, q_n) \end{aligned} \quad (3)$$

где F_x, F_y, F_z - нелинейные функции, преобразующие одни координаты в другие и зависящие от конструкции роботизированного устройства [].

Составляемая далее функция рассогласования подлежит минимизации. Формирование функции рассогласования происходит так, чтобы численное значение этой функции максимально адекватно характеризовало удаленность робота от целевой точки. Рассогласование описано в виде квадратичного отклонения:

$$\begin{aligned} H(q_1, \dots, q_n, x_{ц}, y_{ц}, z_{ц}) &= \\ &= \frac{1}{2}(x_{ц} - x)^2 + \frac{1}{2}(y_{ц} - y)^2 + \frac{1}{2}(z_{ц} - z)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

Частные производные функции H по величинам x, y, z имеют вид:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = x - x_{ц}, \quad \frac{\partial H}{\partial y} = y - y_{ц}, \quad \frac{\partial H}{\partial z} = z - z_{ц}. \quad (5)$$

При использовании градиентного метода для минимизации функций используется информация об их градиенте:

$$\nabla H = \begin{bmatrix} \frac{\partial H(q_1, \dots, q_n, x_{ц}, y_{ц}, z_{ц})}{\partial q_1} \\ \dots \\ \frac{\partial H(q_1, \dots, q_n, x_{ц}, y_{ц}, z_{ц})}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Величины, на которые необходимо переместить каждое из звеньев робота, определяются как:

$$\Delta q_i = -C \cdot \frac{\partial H(q_1, \dots, q_n, x_{ц}, y_{ц}, z_{ц})}{\partial q_i}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

где первый множитель - константа, отражающая физическую связь между величинами компонент вектора градиента и величинами реальных приращений положений звеньев робота за один такт работы алгоритма; второй множитель - соответствующий элемент вектора градиента; знак минус соответствует направлению, двигаясь по которому, соответствующее звено стремится к положению, характеризующему меньшей величиной функции ошибки; dq_i - компоненты вектора модифицированного инверсного градиента:

$$\overline{\partial Q} = -C \cdot \nabla H. \quad (8)$$

Так как системы управления роботами - дискретны, то для повышения точности работы градиентного метода необходимо максимально уменьшить шаг работы алгоритма, т.е. максимально уменьшить константу C .

Результаты моделирования

В результате моделирования созданы виртуальная и физическая модели программируемой системы управления серводвигателями с ограниченным числом периферийных компонентов. Первая модель предназначена для проверки правильности сборки схемы подключения и для тестирования и корректировки управляющего кода. Вторая модель может быть использована как стенд для проведения натурных экспериментов с динамическими данными в условиях жестких аппаратных ограничений.

Работоспособность модели подтверждается полученными данными после прохождения объектом управления произвольного лабиринта (рис.5).

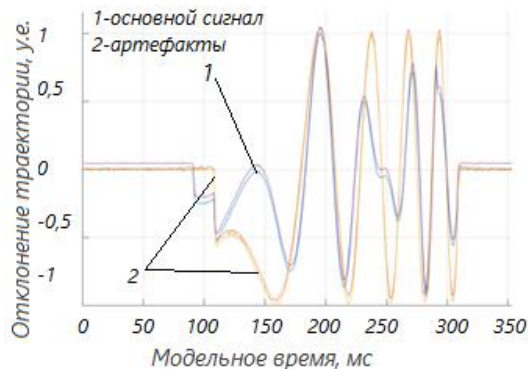


Рис. 5 – Идентификация препятствий и коррекция движения объекта управления во время симуляции

Fig. 5 – Identification of obstacles and correction of the controlled object's motion during simulation

На графике прямая линия с минимальными амплитудами показывает движение по прямой траектории без препятствий. Возникновение амплитудной кривой говорит о том, что управляющая программа корректирует траекторию объекта управления. Несколько амплитудных кривых в одни и те же моменты времени демонстрируют возникшую в системе управления задержку передачи входных и выходных параметров и необходимость введения параллелизма функционирования в связи с повышением вычислительных мощностей задачи.

В дальнейшем для повышения точности процесса управления движущимся объектом, без изменения аппаратной части стенда, необходимо скорректировать управляющий алгоритм, введя метод обратного распространения ошибки, который позволит обеспечить значительное ускорение процедуры вычисления вектора градиента.

Литература

1. Tsymai J.V., Nyrkov A.P., Kardakova M.V., Kolesnichenko S.V., Goloskokov K.P., Modeling the operating range of the fire safety system response parameters on board., Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 434-437 (2020).
2. Колесниченко С.В., Афанасьева О.В., Новожилов И.М., Теоретические аспекты анализа структурных сдвигов

при исследовании процессов динамики сложных технических и социально-экономических систем., Инновации, №10 (240), 108-112 (2018).

3. А.А. Иванов, О.А. Шмаков, Д.А. Демидов, Экспериментальное исследование змеевидного робота «Змеелок-3», Научно-технические ведомости СПбПУ, №1, 132-137 (2013),
4. Isizoh A. N., Obianyo O. R., Ejimofor I. A., Ebih U. J., Alagbu E. E., Application and Analyses of Microcontrollers in Real-Time Systems., International Journal of Advances in Engineering and Management, № 4, 97-104, (2022).
5. Kunikowski W., Czerwiński E., Olejnik P., Awrejcewicz J., An Overview of ATmega AVR Microcontrollers Used in Scientific Research and Industrial Applications, Pomiar Automatyka Robotyka, № 19(1), 15-20, (2015).
6. Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Nikitchuk T. M., Osadchyi V. V., Dubyna O. F., Using Esp32 Microcontroller For Physical Simulation Of The Wireless Remote Control Modem., Radio Electronics, Computer Science, Control, № 3, 206-214, (2023).
7. Woo-Garcia R. M., Argüelles-Lucho P., Montes de Oca-Mora N. J., Salas-Rodriguez S., Sanchez-Vidal, A., Ceron-Alvarez C. A., Osorio-de la Rosa E., Evaluation of Assembler and C Programming Languages on PIC16F877 Microcontroller., Journal of Physics: Conference Series., 2699(1), 116-124, (2024).
8. Цымай Ю.В., Железнов Э.Г., Комиссаров П.В., Исследование эргатических систем управления., Современные наукоемкие технологии, изд-во ООО ИД «Академия Естественных наук», М., № 4, 37-41 (2021).
9. Колесниченко С.В., Исследование подходов по оценке качества сложных технических систем на различных стадиях разработки., Записки Горного института, Том 208, 244-248 (2014).
10. Марлей В.Е., Чертовской В. Д., Интеллектуальные информационные системы. Основы теории и практики., Академия, М., 2010, С.54-68.
11. Цымай Ю.В., Железнов Э.Г., Пахарева М.Д., Колесниченко С.В., Модель оценки процессов функционирования сложного транспортного предприятия., Авт.свид. 2021617682 (2021).
12. Пискарев Д.М., Хальметов Д.Н., Влияние зазора на динамические характеристики мехатронного модуля., Проблемы современной науки и образования, № 18 (100), 21-24 (2017).
13. Пискарев Д.М., Рубцов В.И., Разработка алгоритма формирования траектории движения группы БПЛА., Проблемы современной науки и образования, № 18 (100), 11-13 (2017).
14. Трусев В.А., Проектирование одновибратора без перезапуска на программируемой логической интегральной схеме., Молодой ученый, № 4 (84), 276-278 (2015).
15. Гудков К.В., Гудкова Е.А., Объектно-ориентированное моделирование информационной системы сбора, обработки и хранения данных., Надежность и качество: Труды международного симпозиума (Пенза), 199-203 (2014).

References

1. Tsymai J.V., Nyrkov A.P., Kardakova M.V., Kolesnichenko S.V., Goloskokov K.P., Modeling the working range of fire safety system response parameters on board, Proceedings of the IEEE 2020 Conference "Conference of Young Researchers in Electrical Engineering and Electronics (ElConRus)," 434-437 (2020).
2. Kolesnichenko S.V., Afanasyeva O.V., Novozhilov I.M., Theoretical aspects of the analysis of structural shifts in the study of the dynamics of complex technical and socio-economic systems, Innovations, No. 10 (240), 108-112 (2018).

3. A.A. Ivanov, O.A. Shmakov, D.A. Demidov, Experimental study of the snake-like robot "Zmeelok-3," Scientific and Technical Bulletin of SPbPU, No. 1, 132-137 (2013).
4. Isizoh A. N., Obiany O. R., Ejimofor I. A., Ebih U. J., Alagbu E. E., Application and Analyses of Microcontrollers in Real-Time Systems., International Journal of Advances in Engineering and Management, No. 4, 97-104, (2022).
5. Kunikowski V., Chervinski E., Oleinik P., Avrejevic J., Review of ATmega AVR microcontrollers used in scientific research and industrial applications, Pomiary Automatyka Robotyka, No. 19(1), 15-20, (2015).
6. Vakaluk T. A., Andreev O. V., Nikitchuk T. M., Osadchy V. V., Dubina O. F., Use of the Esp32 microcontroller for physical modeling of a wireless remote control modem, Radioelectronics, Informatics, Management, No. 3, 206-214, (2023).
7. Woo-Garcia R. M., Argüelles-Lucho P., Montes de Oca-Mora N. J., Salas-Rodriguez S., Sanchez-Vidal, A., Ceron-Alvarez C. A., Osorio-de-la-Rosa E., Evaluation of Assembler and C programming languages on the PIC16F877 microcontroller., Journal of Physics: Conference Series., 2699(1), 116-124, (2024).
8. Tsymay Yu.V., Zheleznov E.G., Komissarov P.V., Investigation of ergatic control systems., Modern Science-Intensive Technologies, published by ID "Academy of Natural Sciences," Moscow, No. 4, 37-41 (2021).
9. Kolesnichenko S.V., Research on approaches to assessing the quality of complex technical systems at various stages of development, Notes of the Mining Institute, Vol. 208, 244-248 (2014).
10. Marley V.E., Chertovskoy V.D., Intelligent Information Systems. Fundamentals of Theory and Practice, Academy, Moscow, 2010, pp. 54-68.
11. Tsymay Yu.V., Zheleznov E.G., Pakharev M.D., Kolesnichenko S.V., Model for evaluating the functioning of a complex transport enterprise. Author's certificate 2021617682 (2021).
12. Piskarev D.M., Khaltmetov D.N., Influence of clearance on the dynamic characteristics of a mechatronic module. Problems of Modern Science and Education, No. 18 (100), 21-24 (2017).
13. Piskarev D.M., Rubtsov V.I., Development of an algorithm for forming the trajectory of a group of UAVs. Problems of Modern Science and Education, No. 18 (100), 11-13 (2017).
14. Trusov V.A., Design of a single-vibrator without restart on a programmable logic integrated circuit, Young Scientist, No. 4 (84), 276-278 (2015).
15. Gudkov K.V., Gudkova E.A., Object-oriented modeling of an information system for data collection, processing, and storage. Reliability and Quality: Proceedings of the International Symposium (Penza), 199-203 (2014).

© **Ю.В. Цымай** – аспирант кафедры Математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, (ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова), Санкт-Петербург, Россия, m-walua@yandex.ru; **В. Е. Марлей** – д.т.н., профессор кафедры Вычислительных систем и информатики, ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, MarleyBE@gumrf.ru; **А. В. Васин** – д.т.н., профессор кафедры Прикладной математики, ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, VasinAV@gumrf.ru.

© **Yu. V. Tsymai** – PhD-student of the Department of Mathematical Modeling and Applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (Admiral Makarov SUMIS), Saint Petersburg, Russia, m-walua@yandex.ru; **V. E. Marley** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the Department of Computing Systems and Informatics, Admiral Makarov SUMIS, MarleyBE@gumrf.ru; **A. V. Vasin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the Department of Applied Mathematics, Admiral Makarov SUMIS, VasinAV@gumrf.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 26.11.24.

Дата принятия рукописи в печать – 21.05.25.