

УДК: 004.5, 004.41, 519.1

EDN: [YEMKEW](https://www.edn.net/YEMKEW)

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0243-0253>



## Формализованный подход к проектированию микропроцессорных систем с элементами человеко-машинного взаимодействия

И. В. Ковалев<sup>1,2,3</sup>, В. В. Лосев<sup>1</sup>, А.О. Калинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается методология формализованного подхода по проектированию микропроцессорных систем, обеспечивающих человеко-машинное взаимодействие. Рассмотрены классические процедуры проектирования последовательностных систем (схемной логики), применимые для разработки МП-систем, в частности формальные методики получения таблиц переходов/выходов и графа проектируемого автомата. Основным акцентом проектирования строится на логике графа автомата Мили, характеризуемый тем, что в течение всего периода «устойчивого» состояния  $Q_i$  входной  $X_i$  и выходной  $Z_i$  векторы остаются неизменными. Однако, при этом условные операторы алгоритма селективируют изменения входного вектора  $X_i$ , если оно произошло в состоянии  $Q_i$  под воздействием внешних по отношению к МП-системе событий. В результате такой селекции МП-система переходит к иному «устойчивому» состоянию  $Q_i+k$ , которое определено схемой алгоритма. В качестве примера проектируемой МП-системы выступает контроллер вызова управляющих подпрограмм, соответствующих конкретным режимам работы объекта управления. Предложено программное решение участка алгоритма, обеспечивающего условный переход по результатам реализации процедуры сравнения констант. В качестве обоснования функциональной реализации прототипа проектируемого контроллера приведена принципиальная электрическая схема на базе микроконтроллера, обеспечивающая элементы человеко-машинного взаимодействия.

**Ключевые слова:** МП-система, микроконтроллер, человеко-машинное взаимодействие, граф автомата.

**Для цитирования:** Ковалев, И. В., Лосев, В. В., & Калинин, А. О. (2023). Формализованный подход к проектированию микропроцессорных систем с элементами человеко-машинного взаимодействия. *Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies*, 3(2), 0243–0253. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0243-0253>

## Formalized approach to the design of microprocessor systems with elements of human-machine interaction

I. V. Kovalev<sup>1,2,3</sup>, V. V. Losev<sup>1</sup>, A. O. Kalinin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Reshetnev University, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>3</sup>*Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia*

**Abstract.** The article discusses the methodology of a formalized approach to the design of microprocessor systems that provide human-machine interaction. Classical procedures for designing sequential systems (circuit logic) applicable to the development of MP-systems, in particular, formal methods for obtaining transition/output tables and the graph of the automaton being designed, are considered. The main emphasis of the design is based on the logic of the Mealy automaton graph, characterized by the fact that during the entire period of the “stable” state  $Q_i$ , the input  $X_i$  and output  $Z_i$  vectors remain unchanged. However, at the same time, the conditional statements of the algorithm select changes in the input vector  $X_i$ , if it occurred in the state  $Q_i$  under the influence of events external to the MP-system. As a result of such selection, the MP-system passes to another “stable” state  $Q_{i+k}$ , which is determined by the algorithm scheme. As an example of the designed MP-system, there is a controller for calling control subroutines corresponding to specific modes of operation of the control object. A software solution is proposed for a section of the algorithm that provides a conditional transition based on the results of the implementation of the constant comparison procedure. As a rationale for the functional implementation of the prototype of the designed controller, a circuit diagram based on a microcontroller is given, which provides elements of human-machine interaction.

**Keywords:** MP-system, microcontroller, human-machine interaction, automaton graph.

**For citation:** Kovalev, I. V., Losev, V. V., & Kalinin, A. O. (2023). Formalized approach to the design of microprocessor systems with elements of human-machine interaction. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, 3(2), 0243–0253. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0243-0253>

---

## ВВЕДЕНИЕ

Применение микропроцессоров в различных системах, где требуется сбор, передача, обработка и отображение информации, позволяет обеспечить принципиально новый уровень эксплуатационных характеристик, таких как надежность и простота обслуживания систем, с одной стороны, а также полнота и сложность выполняемых ими функций, с другой.

В наибольшей степени все вышеперечисленные свойства проявляются в однокристальных микроЭВМ или, как их чаще называют по области применения, микроконтроллерах. В микроконтроллерах на одном кристалле объединяются все составные части компьютера: микропроцессор (часто его называют ядром микроконтроллера), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), таймеры и порты ввода – вывода.

Поскольку микроконтроллер является микрочипом – вычислительным устройством, требующих организации внешних схемотехнических решений по

организации системы питания, обеспечения периферийными устройствами ввода – вывода, а также пользовательскими интерфейсами, то вопрос использования возможностей микроконтроллера уходит в плоскость проектирования пользовательских или встраиваемых микропроцессорных систем с элементами интерфейса для обеспечения человеко-машинного взаимодействия.

К настоящему времени формализованные методы проектирования комбинационных и последовательностных схем на интегральных схемах получили широкое теоретическое и практическое развитие. Эти формализованные методы не могут быть непосредственно применены для систем, использующих МП, так как сам МП является программно-управляемым автоматом. Однако некоторые классические процедуры проектирования последовательностных систем (схемной логики) могут быть применены для разработки МП-систем.

В работе показано, что к таким процедурам относятся, прежде всего, формальные методики получения минимизированных таблиц переходов/выходов и графа проектируемого автомата (рисунок 1). Приводимый пример проектирования дает представление об использовании некоторых классических процедур синтеза применительно к МП [1-4].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется спроектировать контроллер вызова управляющих подпрограмм, соответствующих конкретным режимам работы объекта управления [5]. Предполагается, что вызов каждой из подпрограмм осуществляется диспетчером аппаратно, формированием управляющего ключа – комбинации двоичного пятиразрядного числа.

В качестве устройства ввода предполагается использовать набор двухпозиционных переключателей, обеспечивающих формирование устойчивых "1" и "0". Для модельной интерпретации выполнения подпрограмм предусмотрим получение расчетных результатов, в формате двоичных восьмиразрядных чисел.

В качестве устройства вывода для визуального отображения результатов управляющих подпрограмм предусмотрим линейку светодиодов.



Рисунок 1. Последовательность разработки МП-системы.

Figure 1. The sequence of development of the MP-system.

### Инженерная интерпретация задачи

В таблице 1 отражено формализованное описание системы, а на рисунке 2 показана примерная структурная схема контроллера.

Таблица 1. Спецификация выходных управляющих воздействий.

Table 1. Specification of output control actions.

| Векторы |            | $B_7$ | $B_6$ | $B_5$ | $B_4$ | $B_3$ | $B_2$ | $B_1$ | $B_0$ |
|---------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Z_1$   | $1_{(8)}$  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     |
| $Z_2$   | $3_{(8)}$  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     |
| $Z_3$   | $7_{(8)}$  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     |
| $Z_4$   | $15_{(8)}$ | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| $Z_5$   | $0_{(8)}$  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |

Множество входные сигналы  $X$  ( $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ ) соответствует следующему набору значений  $\{1_{(8)}, 3_{(8)}, 4_{(8)}, 5_{(8)}, 7_{(8)}\}$

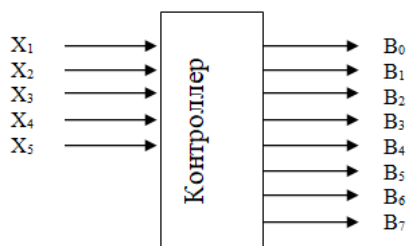


Рисунок 2. Структурная схема проектируемого контроллера.

Figure 2. Structural diagram of the designed controller.

### ПОСТРОЕНИЕ ГРАФА АВТОМАТА И МИНИМИЗАЦИЯ ЧИСЛА ВЕРШИН

На рисунке 3 представлен граф автомата, дуги которого размечены входными и выходными векторами  $x_1x_2x_3x_4x_5V...Vx_1"x_2"x_3"x_4"x_5" V.../Z_1-5$ . Таблица 2, 3 иллюстрируют проектируемые переходы/выходы и отмеченные состояния графа-автомата [6-8].

Таблица 2. Таблица переходов / выходов.

Table 2. Jump/output table.

| Состояние | $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ |          |          |          |          |
|-----------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|
|           | 00001                     | 00011    | 00100    | 00101    | 00111    |
| 1         | 1, $Z_1$                  | 2, $Z_2$ | -        | -        | -        |
| 2         | -                         | 2, $Z_2$ | -        | -        | 3, $Z_3$ |
| 3         | -                         | -        | -        | 4, $Z_4$ | 3, $Z_3$ |
| 4         | -                         | -        | 5, $Z_5$ | 4, $Z_4$ | -        |
| 5         | 1, $Z_1$                  | 2, $Z_2$ | 5, $Z_5$ | 4, $Z_4$ | 3, $Z_3$ |

Таблица 3. Таблица отмеченных состояний.

Table 3. Marked states table.

| Состояние | $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ |       |       |       |       |
|-----------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
|           | 00001                     | 00011 | 00100 | 00101 | 00111 |
| $Q_1$     | $Q_1$                     | $Q_2$ | -     | -     | -     |
| $Q_2$     | -                         | $Q_2$ | -     | -     | $Q_3$ |
| $Q_3$     | -                         | -     | -     | $Q_4$ | $Q_3$ |

|                |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Q <sub>4</sub> | -              | -              | Q <sub>5</sub> | Q <sub>4</sub> | -              |
| Q <sub>5</sub> | Q <sub>1</sub> | Q <sub>2</sub> | Q <sub>5</sub> | Q <sub>4</sub> | Q <sub>3</sub> |

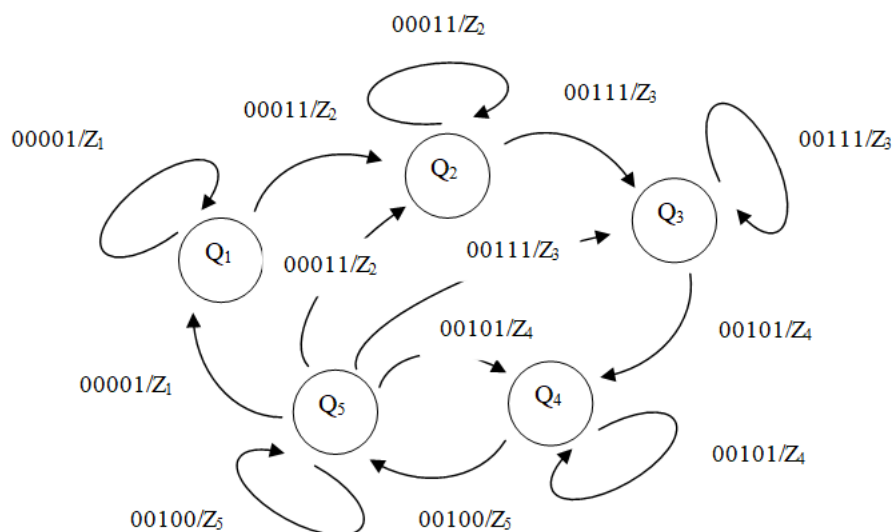


Рисунок 3. Граф автомата проектируемого контроллера.

Figure 3. Automaton graph of the designed controller.

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГРАФА АВТОМАТА В СХЕМУ АЛГОРИТМА

При отображении графа-автомата на блок-схему алгоритма, последняя должна отображать важную особенность. Алгоритм конструируется таким образом, чтобы МП-система непрерывно тестировала входные воздействия и принимала решение о формировании выходного вектора и переходе в иное состояние (рисунок 4).

#### Программное решение участка алгоритма, обеспечивающего условный переход

Анализируя полученный алгоритм работы проектируемого контроллера, следует отметить наличие множества условных переходов. Логика работы контроллера предполагает аппаратный вызов подпрограмм. Таким образом, содержимое входного порта необходимо сравнить с ключом (программной константой), и в результате сравнения происходит либо вызов соответствующей подпрограммы, либо новый условный переход, т.е. сравнение с новой программной константой.

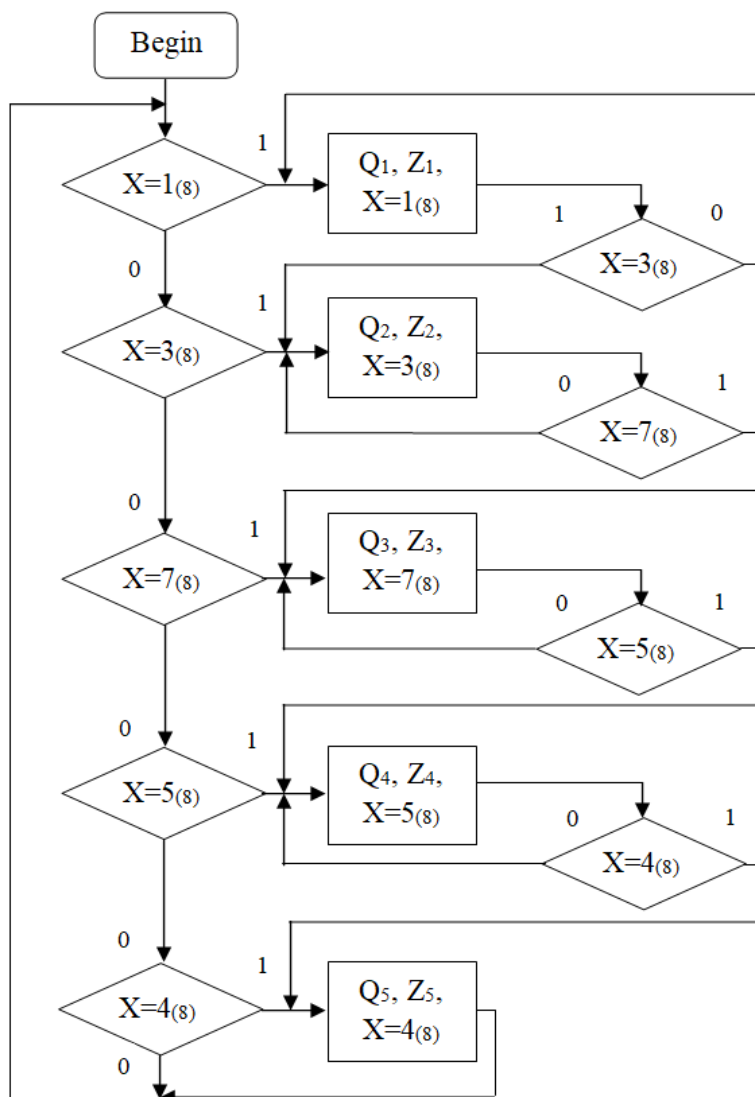


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма работы проектируемого контроллера.

Figure 4. Block diagram of the operation algorithm of the designed controller.

В качестве конкретного примера реализации процедуры сравнения рассмотрим систему команд (MPASM) микроконтроллера PIC16F84 (листинг, иллюстрирующий программный код, обеспечивающий процедуру условного сравнения, представлен ниже) [9].

- |                   |   |
|-------------------|---|
| 1. MOVF PORTA,0   | // пересылка содержимого PORTA в регистр W;   |
| 2. XORLW B'00100' | // операция логического сравнения XOR содержимого регистра W и программной константы;   |
| 3. BTFSC STATUS,Z | // переход по условию, т.е. результату сравнения: на строку 4 при наличии флага нуля (Z) или на строку 5 при отсутствии флага нуля (Z); |

4. CALL PROG1 // вызов подпрограммы PROG1;  
5. MOVF PORTA,0 // пересылка содержимого PORTA в регистр W для обеспечения следующего условного перехода.

### РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА

Поскольку завершающим этапом разработки микропроцессорной системы, согласно рисунку 1, является реализация прототипа, то рассмотрим принципиальную электрическую схему проектируемого контроллера, которая обеспечивает его реализацию (рисунок 5).

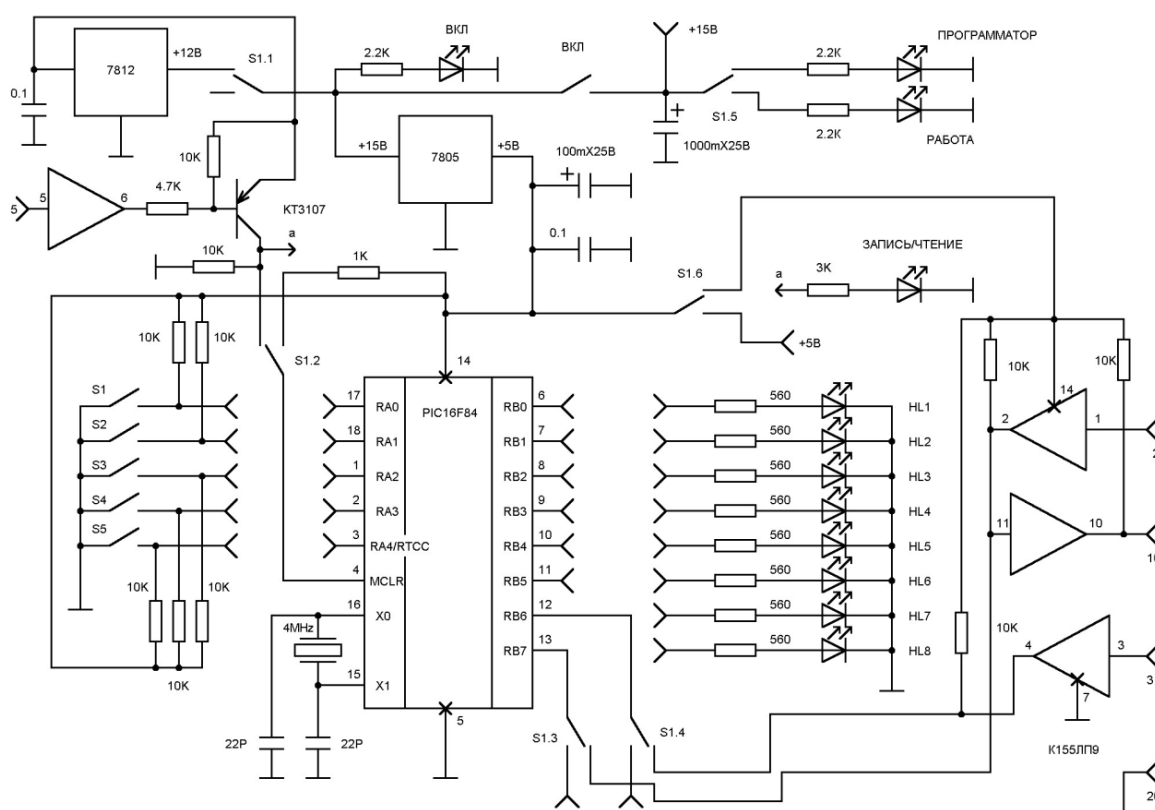


Рисунок 5. Принципиальная электрическая схема проектируемого контроллера на базе микропроцессорной системы.

Figure 5. Schematic diagram of the designed controller based on the microprocessor system.

Базовым узлом схемы выступает микроконтроллер PIC16F84, который и имеет два порта ввода/вывода: PORTA (RA0-RA4) и PORTB (RB0-RB7). В качестве устройства ввода данный выступает двухпозиционный переключатель S1-S5, в качестве устройства вывода применяется линейка светодиодов HL1- HL7, что позволяет диспетчеру,



сопровождающему объект управления, осуществлять управление режимами работы объекта и видеть результаты работы соответствующих подпрограмм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение формализованного подхода к разработке программно-аппаратных комплексов на базе микропроцессорных устройств систематизирует набор и этапность действий, связанных с изучением принципов построения и структурно-функциональных особенностей проектируемых систем, областей применения современных микропроцессоров и микроконтроллеров, а также их использования и практического применения в автоматизированных системах обработки и управления данными. Развитие методологии формализованного проектирования микропроцессорных систем способствует их полнофункциональному использованию с обеспечением человеко-машинного взаимодействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Каган Б.М., Сташин В.В. Основы проектирования микропроцессорных устройств автоматики. М: Энергоатомиздат. 1987. 304.
- [2] Шаталов Н.В. Проектирование вычислительного устройства на базе микроконтроллера. Перспективы развития информационных технологий. 2015; 24: 59-64.
- [3] Глаголев В.М., Баранова Е.М., Щепакин К.М. Проектирование вычислительного устройства на базе микроконтроллера. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013; 9-2: 56-61.
- [4] Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристальных микроконтроллерах. М.: Энергоатомиздат. 1990. 224.
- [5] Ковалев И.В. и др. Автоматизированные системы управления (учебное пособие). Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2016. 240.
- [6] Брауэр В. Введение в теорию конечных автоматов. М: Радио и связь. 1987. 392.
- [7] Виноградова М.С., Ткачев С.Б., Кандаурова И.Е. Особенности процедуры детерминизации конечных автоматов. Математика и математическое моделирование. 2017; 4: 1-17.
- [8] Гапанович Д.А., Сухомлин В.А. Алгебра конечных автоматов как математическая модель цифрового двойника умного производства. Современные информационные

технологии и ИТ-образование. 2022; 18(2): 353-366.

[9] Лосев В.В., Титович М.В. Микропроцессоры в системах управления (курс лекций). Красноярск: СибГТУ. 2014. 100.

## REFERENCES

[1] Kagan B.M., Stashin V.V. Osnovy proektirvoaniya mikroprocessornykh ustrojstv avtomatiki. M: Energoatomizdat. 1987. 304.

[2] Shatalov N.V. Proektirovanie vychislitel'nogo ustrojstva na baze mikrokontrollera. Perspektivy razvitiya informacionnykh tekhnologij. 2015; 24: 59-64.

[3] Glagolev V.M., Baranova E.M., Shchepakina K.M. Proektirovanie vychislitel'nogo ustrojstva na baze mikrokontrollera. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013; 9-2: 56-61.

[4] Stashin V.V., Urusov A.V., Mologonцева O.F. Proektirovanie cifrovyykh ustrojstv na odnokristal'nykh mikrokontrollerah. M.: Energoatomizdat. 1990. 224.

[5] Kovalev I.V. i dr. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya (uchebnoe posobie). Krasnoyarsk: Sib. gos. aerokosmich. un-t. 2016. 240.

[6] Brauer V. Vvedenie v teoriyu konechnyykh avtomatov. M: Radio i svyaz'. 1987. 392.

[7] Vinogradova M.S., Tkachev S.B., Kandaurova I.E. Osobennosti procedury determinizatsii konechnyykh avtomatov. Matematika i matematicheskoe modelirovanie. 2017; 4: 1-17.

[8] Gapanovich D.A., Suhomlin V.A. Algebra konechnyykh avtomatov kak matematicheskaya model' cifrovogo dvojnika umnogo proizvodstva. Sovremennyye informacionnyye tekhnologii i IT-obrazovanie. 2022; 18(2): 353-366.

[9] Losev V.V., Titovich M.V. Mikroprocessory v sistemah upravleniya (kurs lektsiy). Krasnoyarsk: SibGTU. 2014. 100.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ковалев Игорь Владимирович**, доктор технических наук, профессор, кафедра информатики ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», профессор, Красноярск, Россия  
e-mail: kovalev\_fsu@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-2128-6661

**Igor Kovalev**, doctor of technical sciences, professor, department of computer science, Federal state autonomous educational institution of higher education «Siberian Federal University», professor, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Лосев Василий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра

**Vasiliy Losev**, candidate of technical sciences, docent, department of automation of

автоматизации производственных процессов  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
университет науки и технологий имени  
академика М.Ф. Решетнева», доцент  
e-mail: basilos@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-1996-2889

production processes, Federal state budgetary  
educational institution of higher education  
«Reshetnev Siberian State University of  
Science and Technology», docent,  
Krasnoyarsk, Russian Federation

**Калинин Андрей Олегович**, ФГБОУ ВО  
«Сибирский государственный университет  
науки и технологий имени академика М.Ф.  
Решетнева», соискатель ученой степени  
кандидата технических наук, Красноярск,  
Россия  
e-mail: mpx\_@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-4237-3860

**Andrey Kalinin**, Federal state budgetary  
educational institution of higher education  
«Reshetnev Siberian State University of  
Science and Technology», applicant for the  
degree of candidate of technical sciences,  
Krasnoyarsk, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 29.05.2023; одобрена после рецензирования 23.06.2023; принята  
к публикации 26.06.2023.*

*The article was submitted 29.05.2023; approved after reviewing 23.06.2023; accepted for publication  
26.06.2023.*