

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

УДК 51-7

DOI: 10.18101/2304-5728-2018-4-48-57

ЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ¹

© Мандаров Эрдэни Борисович

кандидат технических наук, старший преподаватель,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий
и управления
Россия, 670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В
E-mail: erdman77@mail.ru

© Улаханов Николай Сергеевич

старший преподаватель,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий
и управления
Россия, 670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В
E-mail: nulahanov@mail.ru

© Батуев Цырен Александрович

аспирант,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий
и управления
Россия, 670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В
E-mail: batuevc@mail.ru

© Грешилов Анатолий Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий
и управления
Россия, 670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В
E-mail: stanki@esstu.ru

© Никифоров Семен Очирович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: nbs76@mail.ru

В статье приведены результаты математического моделирования системы
управления робототехническим комплексом листовой штамповки титановых

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта «Молодые ученые
ВСГУТУ»

поковок для лопастей несущего винта вертолета посредством конечных автоматов. Использование данного математического аппарата позволяет представить единую логику управления робототехническим комплексом, состоящим из множества взаимодействующих подсистем, выполняющих общее задание. Предлагается подход, позволяющий на этапе проектирования робототехнического комплекса и разработки технологического процесса штамповки описать логику диспетчерского управления, планирования и реагирования на ошибки при работе, в виде конечно-автоматной сети функционирования всех подсистем комплекса. Предметом исследования является структура системы управления робототехническим комплексом, состоящим из автоматизированного оборудования для листовой штамповки, устройства радиационного нагрева заготовок, устройства подачи заготовок, устройства приема готовых изделий и промышленного робота-манипулятора.

Ключевые слова: робототехнический комплекс; радиационный нагрев; штамповка; конечные автоматы; система управления; математическое моделирование.

Введение

При проектировании дискретных производственных систем, к которым относятся робототехнические комплексы, широко применяются математические модели. На стадии разработки структурно-компоновочных схем и алгоритмов функционирования таких комплексов эффективно применение такого метода дискретной математики, как конечные автоматы [1; 2], подробно описанные в статье [3]. Этот подход применяется в данной статье.

1. Описание организационной структуры робототехнического комплекса

Робототехнический комплекс штамповки титановых сплавов включает в себя автоматизированное оборудование для штамповки, устройство радиационного нагрева заготовок, промышленного робота-манипулятора, устройства подачи заготовок и приема готовых изделий. Компоновочная структура робототехнического комплекса и кинематическая схема робота-манипулятора представлены на рис. 1.

На рис. 2 представлены схема обслуживания для штамповки промышленным роботом и принцип работы комплекса, где использованы следующие обозначения: 1 — автоматизированное оборудование для штамповки (гидравлический пресс); 2 — гидроцилиндр; 3 — пуансон; 4 — устройство радиационного нагрева (лампы); 5 — матрица; 6 — устройство подачи заготовок; 7 — устройство приема готовых изделий; 8 — заготовка (титановый лист из материала ОТ4-1); P_1, P_2 — рабочее (поступательное) движение штока гидроцилиндра; P_3, P_4 — рабочее (поступательное) движение устройства радиационного нагрева; 0 — положение заготовки и детали в устройствах подачи заготовок и приема готовых изделий; p_i — точки позиционирования промышленного робота при обслуживании комплекса; u_i^k — управляющий сигнал по степени подвижности промышленного робота. В данной работе при моделировании робототехнического

плекса будет использоваться промышленный робот-манипулятор с цилиндрической системой координат, конфигурация рабочего пространства которого показана на рис. 1б.

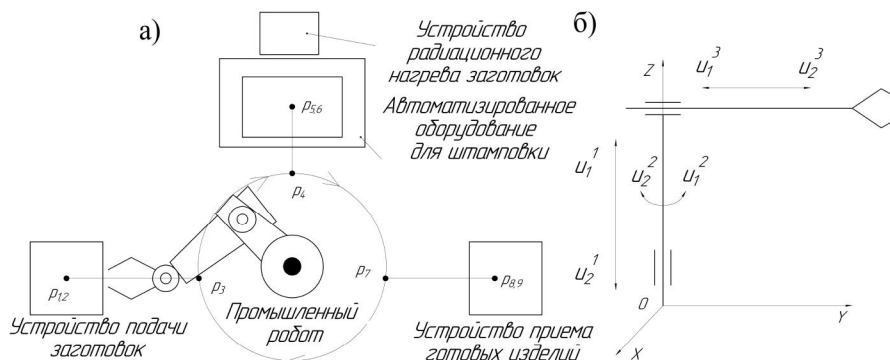


Рис. 1. а) Компонентная схема роботоконкомплекса; б) кинематическая схема промышленного робота-манипулятора

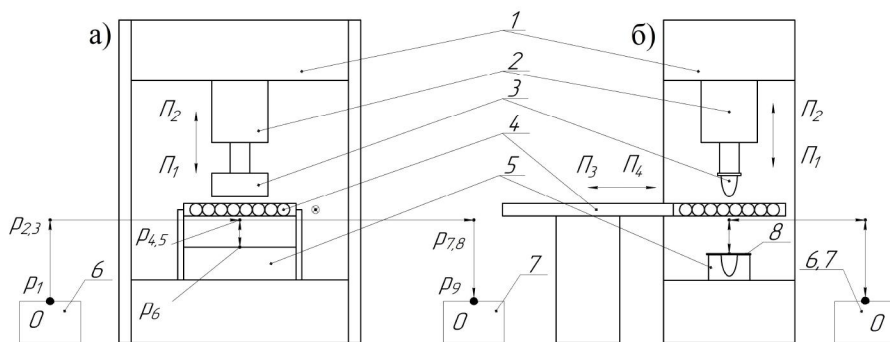


Рис. 2. Схема обслуживания оборудования для штамповки промышленным роботом и принцип работы комплекса, где: а) вид спереди; б) вид сбоку

Зона обслуживания роботом пресса показана на рис. 3. Область обслуживания роботом построена таким образом, чтобы точки позиционирования схвата в рабочей зоне пресса, устройствах выдачи заготовок и приема изделий были идентичны для движения по степеням подвижности.

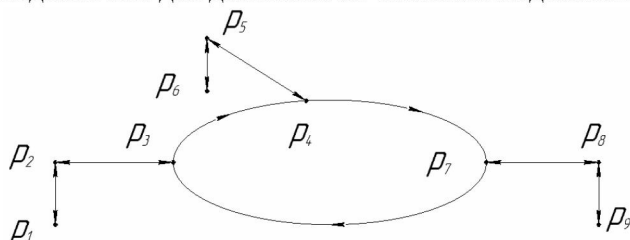


Рис. 3. Область обслуживания промышленным роботом пресса, где p_i — точки позиционирования робота

Работа роботокомплекса осуществляется следующим образом:

- системой управления подается команда о начале работы («Пуск»). Комплекс находится в начальном состоянии;
- устройство подачи заготовок, оснащенное датчиком наличия, помещает заготовку в точку выдачи. Датчик наличия подает сигнал о присутствии заготовки и возможности ее взятия роботом;
- промышленный робот перемещает схват в позицию загрузки детали в устройство подачи заготовок. Производится захват заготовки, датчик информирует о наличии заготовки в схвате робота. Производится перемещение заготовки в рабочую зону пресса. Датчик положения робота сигнализирует о присутствии схвата с заготовкой в рабочей зоне пресса. Промышленный робот устанавливает заготовку в пресс-форму. Промышленный робот выводит схват из рабочей зоны;
- после установки заготовки в пресс-форму и удаления схвата робота на безопасное расстояние производится нагрев детали. Устройство радиационного нагрева с помощью поступательного движения П₄ вводится в рабочую зону пресса. Датчик положения устройства информирует о требуемом положении над заготовкой. Производится нагрев изделия (включаются лампы радиационного нагрева, длительность нагрева 80–120 секунд). После окончания цикла нагрева лампы выводятся из рабочей зоны с помощью поступательного движения П₃. Датчик положения подает сигнал о исходном положении устройства радиационного нагрева;
- после того как нагревательное устройство возвращается в исходное положение, опускается шток гидроцилиндра с пуансоном в матрицу. Производится процесс горячей штамповки. Датчик положения штока сигнализирует о конечном положении пуансона. Производится выдержка пуансона в матрице с заготовкой (длительность выдержки 10 секунд). Далее производится подъем штока гидроцилиндра с пуансоном в исходное состояние. Датчик положения информирует о возврате штока в нулевое положение;
- после окончания цикла штамповки промышленный робот вводит схват в рабочую зону пресса, производит захват детали и транспортирует ее в устройство приема готовых изделий;
- устройство приема готовых изделий, оснащенное датчиком наличия, подает сигнал о наличии детали.
- осуществляется запрос системы управления о повторении рабочего цикла или окончании работы роботокомплекса.

2. Моделирование работы подсистем роботокомплекса

В работе предлагается использовать конечные автоматы для описания логики работы подсистем комплекса. Абстрактным конечным автоматом называют пятерку [4; 5]:

$$A = (U, X, Z, f, h), \quad (1)$$

где $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ — конечный входной алфавит; $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — конечное множество состояний; $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ — конечный выходной алфавит; $f: X \times U \rightarrow X$ — одношаговая функция перехода; $h: X \times U \rightarrow Z$ — функция выхода.

Таким образом, описание робота-манипулятора как объект управления в виде конечного автомата имеет следующий вид (графическое представление конечного автомата в виде ориентированного графа представлено на рис. 4):

$$U_1 = \{u_1^1, u_2^1, u_1^2, u_2^2, u_1^3, u_2^3\}, \tag{2}$$

$$X_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}, Z_1 = \{d_1^1, d_2^1, d_1^2, d_2^2, d_1^3, d_2^3\},$$

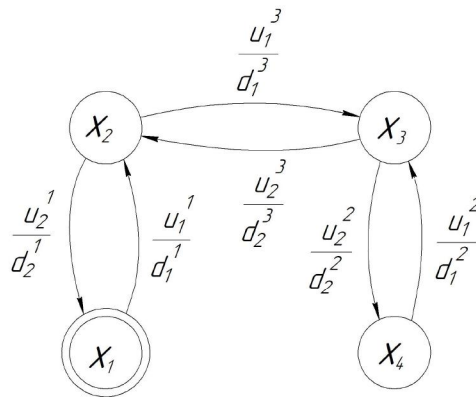


Рис. 4. Конечный автомат системы управления роботом

где u_i^k — управляющий сигнал, приводящий каждую степень подвижности в движение; x_1 — исходное положение робота (в точке p_1); x_2 — движение стойки робота по вертикали; x_3 — движение руки робота по горизонтали; x_4 — вращательное движение робота (поворот вокруг оси). Манипулятор снабжен датчиками, которые информируют систему управления о нахождении схвата робота в необходимом положении — d_j^i .

Модель системы представляет собой автомат Мили [1].

Подобным образом опишем логику управления остальными подсистемами комплекса в виде конечных автоматов, графическое представление которых представлено на рис. 5.

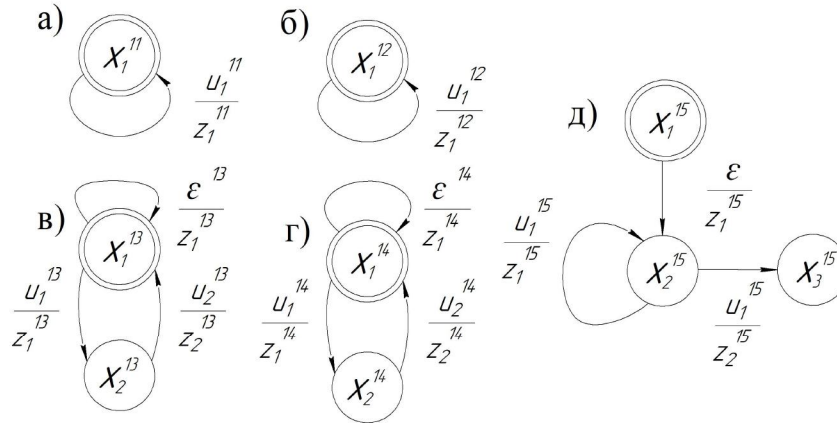


Рис. 5. Конечно-автоматные модели подсистем роботоконплекса:
 а) модель устройства подачи заготовок; б) модель приема готовых изделий; в) модель устройства радиационного нагрева; г) модель пресса; д) модель системы управления (верхний уровень) роботоконплексом

Устройства подачи заготовок (рис. 5а) и приема готовых изделий (рис. 5б) как объект управления в виде конечных автоматов имеет следующий вид:

$$U_{2,3} = \{u_i^i\}, X_{2,3} = \{x_i^{li}\}, Z_{2,3} = \{z_i^{li}\}, \quad (3)$$

где u_1^{11} — управляющее воздействие для подачи заготовки; u_1^{12} — управляющее воздействие для приема готовых изделий; z_1^{11} — сигнал датчика о наличии заготовки в устройстве; z_1^{12} — сигнал датчика о наличии готовой детали в устройстве; x_1^{11} — состояние устройства с заготовкой; x_1^{12} — состояние устройства с готовым изделием.

Устройство радиационного нагрева (рис. 5в) и пресс (рис. 5г) как объект управления в виде конечных автоматов имеет следующий вид:

$$U_{4,5} = \{\varepsilon^{li}, u_1^{li}, u_2^{li}\}, X_{4,5} = \{x_1^{li}, x_2^{li}\}, Z_{4,5} = \{z_1^{li}, z_2^{li}\}, \quad (4)$$

где u_1^{13} — управляющее воздействие для поступательного движения П₄ устройства радиационного нагрева; u_2^{13} — управляющее воздействие для поступательного движения П₃ устройства радиационного нагрева; z_1^{13} — сигнал датчика о требуемом положении устройства радиационного нагрева над заготовкой; z_2^{13} — сигнал датчика о исходном положении устройства радиационного нагрева; x_1^{13} — исходное состояние устройства радиационного нагрева; x_2^{13} — положение устройства радиационного нагрева над заготовкой (рабочее положение); u_1^{14} — управляющее воздействие для поступательного движения П₁ штока гидроцилиндра пресса; u_2^{14} — управляющее воздействие для поступательного движения П₂ штока гидроци-

линдра пресса; z_1^{14} — сигнал датчика о требуемом положении штока гидроцилиндра; z_2^{14} — сигнал датчика о исходном положении штока гидроцилиндра; x_1^{14} — исходное состояние устройства штока гидроцилиндра; x_2^{14} — рабочее положение штока гидроцилиндра (процесс выдержки в пресс-форме); ε^{1i} — управляющее воздействие для включения устройства (нагревательного устройства или пресса соответственно).

Система управления роботоконплексом (рис. 5д) в виде конечного автомата имеет вид:

$$U_6 = \{\varepsilon, u_1^{15}\}, X_6 = \{x_1^{15}, x_2^{15}, x_3^{15}\}, Z_6 = \{z_1^{15}, z_2^{15}\}, \quad (5)$$

где ε — управляющее воздействие для включения роботоконплекса (вкл. питания); u_1^{15} — управляющий сигнал начала цикла; z_1^{15} — сигнал датчика о выполнении цикла; z_2^{15} — сигнал датчика о окончании цикла; x_1^{15} — исходное состояние роботоконплекса; x_2^{15} — работа роботоконплекса; x_3^{15} — конец цикла.

3. Модель управляющего автомата

Управляющий автомат выполняет задачу управления робототехническим конплексом. Задача управляющего автомата — обеспечить смену состояний X_i^k управляемых подсистем роботоконплекса по определенной программе.

Структурная схема регулятора, играющего роль системы управления верхнего уровня представлена на рис. 6, где A_1 — граф автомата робота, A_2 — граф автомата устройства подачи заготовок, A_3 — граф автомата устройства приема деталей, A_4 — граф автомата пресса, A_5 — граф автомата пресса, A_6 — граф автомата системы управления.

Управляющий автомат имеет вид [6]:

$$A = (Z, X^R, U, f^R, h^R), \quad (6)$$

где $U = U_1 \cup U_2 \cup U_3 \cup U_4 \cup U_5 \cup U_6$ — объединенный входной алфавит; $X^R = X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup X_4 \cup X_5 \cup X_6$ — объединенное множество состояний; $Z = Z_1 \cup Z_2 \cup Z_3 \cup Z_4 \cup Z_5 \cup Z_6$ — объединенный выходной алфавит.

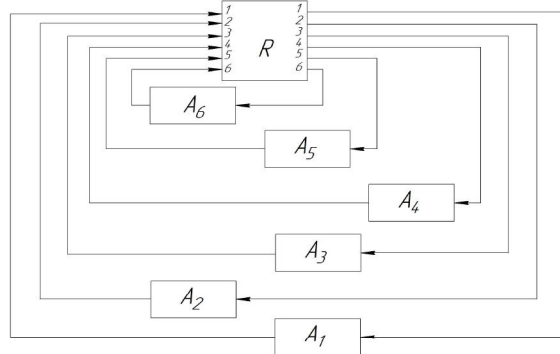


Рис. 6. Структурная схема регулятора

Графическое представление управляющего автомата представлено на рис. 7:

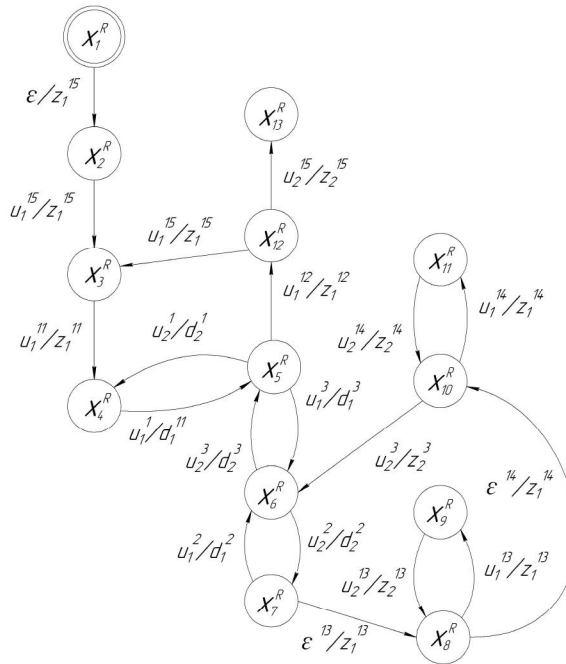


Рис. 7. Управляющий автомат роботоконплекса

Управляющий автомат обеспечит работу подсистем роботоконплекса по заданному циклу работы:

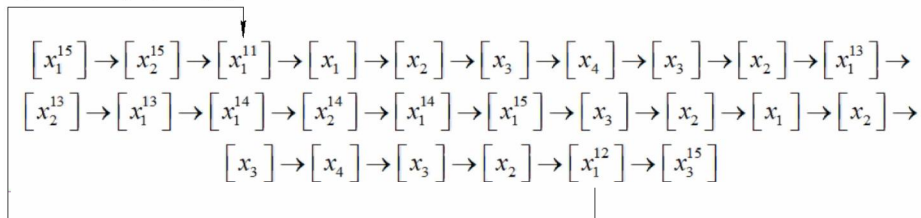


Рис. 8. Цикл работы подсистем роботоконплекса

Заключение

В данной статье представлены результаты и основные предпосылки разработки системы управления робототехническим комплексом, которые могут быть использованы при моделировании работы данного комплекса в современных системах компьютерного моделирования. Разработанная логика системы управления позволит на этапе проектирования робототехнического комплекса предъявить требования к структуре системы управления.

Литература

1. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 400 с.
2. Максимов А. А., Гао Чжинин. Управление робототехническими комплексами на основе конечных автоматов с переменной структурой // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2001. № 1. С. 112.
3. Максимов А. А. Один подход к построению конечно-автоматной управляющей сети // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. 6. Робототехнические системы. 2012. С. 14–29.
4. Новорусский В. В. Конечноавтоматные системы управления (принципы построения и анализ поведения). Новосибирск.: Наука, 1982. 270 с.
5. Руднев В. В. Конечный автомат как объект управления // Автоматика и телемеханика. 1978. № 9. С. 126–135.
6. Иванов В. А., Медведев В. С. Математические основы теории оптимального и логического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 599 с.

LOGICAL CONTROL OF THE ROBOTIC SYSTEM FOR SHEET STAMPING OF TITANIUM ALLOYS

Erdeni B. Mandarov

Cand. Sci. (Engineering), Senior Lecturer,
East-Siberian State University of Technology and Management
40v Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia
E-mail: erdman77@mail.ru

Nikolay S. Ulakhanov

Senior Lecturer,
East-Siberian State University of Technology and Management
40v Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia
E-mail: nulakhanov@mail.ru

Tsyren A. Batuev

Research Assistant,
East-Siberian State University of Technology and Management
40v Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia
E-mail: batuevc@mail.ru

Anatoly D. Greshilov

Cand. Sci. (Engineering), A/Prof.,
East-Siberian State University of Technology and Management
40v Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia
E-mail: stanki@esstu.ru

Semen O. Nikiforov

Dr. Sci. (Engineering), Prof., Chief Researcher,
Institute of Material Physics SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia
E-mail: nbs76@mail.ru

The article deals with the mathematical modeling of the system of robotics control of the titanium forgings stamping for helicopter rotor blades by means of finite-state machines. The use of this mathematical apparatus has allowed us to present a single control logic for controlling a robotic system consisting of a number of interacting sub-systems that perform a common task.

We have proposed an approach describing the logic of dispatching control, planning and responding to errors during operation in the form of a finite-state-machine network of all subsystems of the robotic system at the stage of its design and development of the stamping technological process.

The article studies the structure of the system for robotics control, including the automated equipment for sheet metal stamping, a device for radiation heating of forgings, a stock feeder, a device for receiving finished products and an industrial robotic manipulator.

Keywords: robotic system; radiation heating; stamping, finite-state machines; control system; mathematical modeling.

References

1. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Basics of Controlling Robotic Manipulators]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2000. 400 p.
2. Maksimov A. A., Gao Zhining. Upravlenie robototekhnicheskimi kompleksami na osnove konechnykh avtomatov s peremennoi strukturoi [Robotics Control Based on State Machines with Variable Structure]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana — Bulletin of Bauman Moscow State Technical University*. 2001. No. 1. P. 112.
3. Maksimov A. A. Odin podkhod k postroeniyu konechno-avtomatnoi upravlyayushchei seti [An Approach to Building a Finite-State-Machine Control Network]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Priborostroenie. Spets. vyp. 6: Robototekhnicheskie sistemy* *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Instrumentation. Special Edition 6: Robotic Systems*. 2012. Pp. 14–29.
4. Novorusskii V. V. *Konechnoavtomatnye sistemy upravleniya (printsipy postroyeniya i analiz povedeniya)* [Finite-State-Machine Control Systems (principles of construction and analysis of behavior)]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1982. 270 p.
5. Rudnev V. V. Konechnyi avtomat kak ob"ekt upravleniya [State Machine as a Controlled Object]. *Avtomatika i telemekhanika — Automation and Remote Control*. 1978. No. 9. Pp. 126–135.
6. Ivanov V. A., Medvedev V. S. *Matematicheskie osnovy teorii optimal'nogo i logicheskogo upravleniya* [Mathematical Foundations of the Theory of Optimal and Logical Control]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2011. 599 p.