

---

---

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

---

---

УДК 519.713:681.52

М.Б. ЄДИНОВИЧ, І.В. БАЙРАК, С.Л. КАРПЕНКО  
Херсонський національний технічний університет

**ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНИХ АВТОМАТІВ ПРИ  
ПРОГРАМУВАННІ ПРОГРАМОВАНИХ ЛОГІЧНИХ КОНТРОЛЕРІВ**

*У статті досліджуються перспективні моделі дискретних автоматів, сумісні з мовами програмування програмованих логічних контролерів (ПЛК). Розглянуто методи і засоби проектування й реалізації систем управління дискретними подійними системами на основі ПЛК з використанням ієрархічних модульних недетермінованих автоматів (ІМНДА). Розглянуті у статті підходи дозволяють спеціалістам-технологам з базовими навичками програмування розробляти програми для ПЛК для реалізації складних алгоритмів управління технологічними процесами.*

*Для навчання студентів кафедри технічної кібернетики ХНТУ та дослідження моделей дискретних автоматів було розроблено навчально-дослідницький стенд. Стенд складається з PLC OWEN63, а також ПК та моделі об'єкта управління. Програмування контролера PLC63 виконується в середовищі CODESYS за допомогою мов IEC 61131-3.*

*Ключові слова: програмований логічний контролер, дискретний автомат, структурований текст, релейна діаграма, діаграма функціональних блоків, дискретні подійні системи.*

М.Б. ЕДИНОВИЧ, И.В. БАЙРАК, С.Л. КАРПЕНКО  
Херсонский национальный технический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНЫХ АВТОМАТОВ ПРИ  
ПРОГРАММИРОВАНИИ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ  
КОНТРОЛЛЕРОВ**

*В статье исследуются перспективные модели дискретных автоматов, совместимые с языками программирования программируемых логических контроллеров (ПЛК). Рассмотрены методы и средства проектирования и реализации систем управления дискретными событийными системами на основе ПЛК с использованием иерархических модульных недетерминированных автоматов (ИМНДА). Рассмотренные в статье подходы позволяют специалистам-технологам с базовыми навыками программирования разрабатывать программы для ПЛК для реализации сложных алгоритмов управления технологическими процессами.*

*Для обучения студентов кафедры технической кибернетики ХНТУ и исследования моделей и дискретных автоматов был разработан учебно-исследовательский стенд. Стенд состоит из PLC OWEN63, а также ПК и модели объекта управления. Программирование контроллера PLC63 выполняется в среде CODESYS с помощью языков IEC 61131-3.*

*Ключевые слова: программируемый логический контроллер, дискретные автоматы, структурированный текст, релейная диаграмма, диаграммы функциональных блоков, дискретные событийные системы.*

M.B. YEDYNOVYCH, I.V. BAIRAK, S.L. KARPENKO  
Kherson National Technical University

## APPLICATION OF DISCRETE AUTOMATA MODELS AT PROGRAMMING OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS

*The application of digital technologies in the modern industry is due to the introduction of programmable logic controllers, personal and industrial computers at all levels of automated control systems. A significant number of management tasks in these systems are described by models of discrete automata, on the basis of which algorithms and programs for digital control are developed.*

*The article deals with the procedure of developing programs for programmable logic controllers on the basis of models belonging to the class of discrete event dynamic systems (DEDS). These systems are characterized by the discreteness of the space of states. Typically, Petri Networks and their extensions are used to design systems using the DEDS model. Despite its versatility of the model, created on the basis of this methodology in the study of parallel processes have a complex implementation. Instead, the use of nondeterministic automata (NA) makes it possible to investigate the location of an automaton in several local states when activating multiple transitions. An improved structure of non-deterministic automata in the form of a hierarchical model with a modular structure makes it quite easy to create programs for programmable logic controllers using the IEC 61131-3. The base module of HMNA is implemented on the basis of LD and FBD. It should be noted that in the case of modeling a discrete machine using graphs or Petri Networks, the direct use of IEC 61131-3 languages is rather problematic, so the structure of the DEDS design tool system based on the HMNA is proposed. This approach can be considered promising as it allows specialists with basic programming skills to develop digital control software for implementing complex algorithms.*

*A training and research stand was created for students of the Department of Technical Cybernetics of KNTU and conducting research in the field of discrete automata. The stand consists of a PLC OWEN63, a PC and a control object model. PLC63 controller programming is carried out in the CODESYS environment using languages IEC 61131-3.*

*Keywords: programmable logic controller, discrete automata, structured text, ladder diagram, function block diagrams, discrete event systems.*

### Постановка проблеми

Програмовані логічні контролери ПЛК (PLC) ведуть свій родовід від Modular Digital Controller -Modicon, який по суті був програмованим аналогом релейно-контактних схем управління. Модель Modicon 084 мала обсяг пам'яті 4 кБ і випускалася протягом десяти років. Сучасні ПЛК, окрім функцій дискретного управління, підтримують аналогові закони управління та мають розвинену систему входів/виходів з підтримкою обміну по цифровій мережі.

Як відомо [1], теорія цифрових автоматів розвивалася паралельно із розвитком ЕОМ. Історично спочатку почала розбудовуватися та частина теорії синтезу автоматів, яка має справу з етапом комбінаційного синтезу. У роботах В.І. Шестакова й К. Шеннона була вперше продемонстрована плідотворність ідеї застосування розвинуеного раніше в рамках математичної логіки апарата так званої булевої алгебри до проблем комбінаційного синтезу релейно-контактних схем.

Розвиваючись у рамках логіко-математичної теорії релейно-контактних схем, теорія комбінаційного синтезу досягла значних успіхів і після появи електронних цифрових машин стала успішно пристосовуватися до проблем синтезу схем з електронних логічних елементів.

На нижніх рівнях ієрархії АСУТП ПЛК займають домінуючі позиції і практично витіснили ПК і однокристальні мікроконтролери завдяки спеціалізованій конструкції і розвиненому інтерфейсу. Для спрощення програмування ПЛК було розроблено стандарт ІЕС 61131-3, який описує мови програмування для програмованих логічних контролерів. Стандарт включає текстові мови: ST (структурований текст), IL (мова інструкцій) та графічні мови SFC (послідовні функціональні блоку), FBD, (діаграми функціональних блоків) LD (релейні діаграми). Наявність мов стандарту ІЕС 61131-3 дозволяє спеціалістам з базовими навичками програмування розробляти програмне забезпечення ПЛК. Але простота програмування може зіграти злий жарт із розробниками, оскільки проєктанти здебільшого послуговуються інтуїцією і власним досвідом, уникаючи системного підходу в розробці дискретного пристрою управління. У підсумку такий підхід призводить до появи помилок та затягування строків розробки проєкту. Тому очевидно, що застосування теорії дискретних автоматів дозволить врахувати усі можливі комбінації в роботі пристрою, забезпечить систему від зациклювань та аварійних ситуацій.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задачі дискретного управління поділяються на дві основні групи – комбінаційні автомати та автомати з пам'яттю або послідовнісні [2]. Автомати першої групи формують вихідні сигнали, що не залежать від попереднього стану пристрою і визначаються лишень комбінацією сигналів на вході пристрою. Програмування ПЛК у цьому випадку зводиться до визначення логічної функції і не становить особливої проблеми.

А Автомати другого типу описуються відомими моделями Мура і Мілі. На відміну від автомата Мура, автомат Мілі відображає стан входу  $X$  управляючого автомата на його вихід  $Y$  без затримки, що підвищує швидкодію системи в цілому. Водночас відсутність затримки з боку операційного автомата може призвести до помилки в управляючому автоматі. У такому випадку доцільно використовувати автомат Мура. Для усунення подібних протиріч застосовують моделі, що об'єднують властивості обох автоматів, наприклад, в роботі [3] була запропонована композиційна модель СТ (рис. 1) та її модифікація CTS.

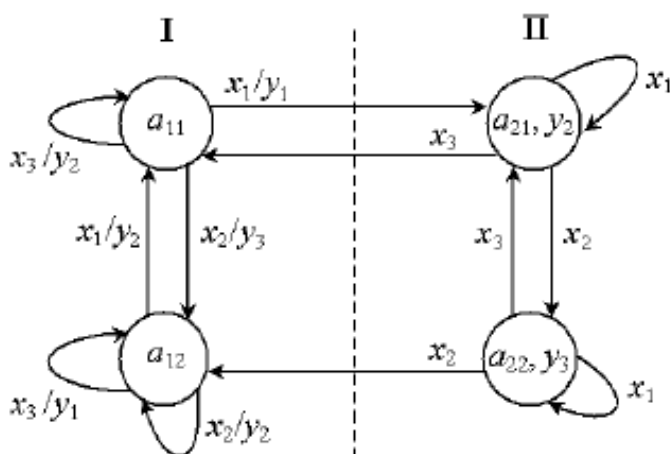


Рис. 1. Приклад графа СТ-автомата, I – підграф автомата Мілі, II – підграф автомата Мура

СТ-автомат об'єднує властивості автоматів Мілі і Мура і проявляє ті, чи інші властивості цих автоматів на одному абстрактному виході. Модель CTS подібна до СТ, але реалізує властивості автоматів Мура і Мілі незалежно у просторі координат

векторного виходу автомата та у часі. СТС модель узагальнює властивості автоматів Мура, Мілі С, СТ і може вироджуватися у будь-який з них.

Як видно з розглянутого прикладу класичні моделі Мура і Мілі не відповідають у повній мірі сучасним вимогам (надійності, швидкодії), тому ведеться розробка сучасної концепції кінцевого автомата.

#### Мета дослідження

У статті досліджуються перспективні моделі дискретних автоматів, сумісні з мовами програмування ПЛК.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасній теорії дискретних автоматів розробляється модель нового класу, що належить до дискретних динамічних систем - дискретні подійні системи ДПС (Discrete Event Dynamic Systems – DEES) [4]. Зазвичай для проектування систем з використанням моделі ДПС застосовуються мережі Петрі та їхні розширення. Попри свою універсальність, моделі, створені на основі зазначеної методики, при дослідженні паралельних процесів мають складну реалізацію. Натомість, застосування недетермінованих автоматів (НДА) дає можливість досліджувати знаходження автомата в кількох локальних станах при активації кількох переходів [5]. Структура відомих НДА є одномірною, що не дозволяє досліджувати складні ієрархічні системи автоматички. У роботі [6] запропонована ієрархічна модель НДА з модульною структурою - ІМНДА. Базисний модуль ІМНДА визначається наступним кортежем:

$$MB = (EI, DI, DO, S, \delta, \varphi, \gamma, g_0), \quad (1)$$

де  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$  – множина локальних станів автомату,  $EI = \{ei_1, ei_2, \dots, ei_n\}$  множина імпульсних входів;  $DI = \{di_1, di_2, \dots, di_m\}$  – множина потенціальних сигналів управління;  $EO = \{eo_1, eo_2, \dots, eo_p\}$  – множина імпульсних виходів;  $DO = \{do_1, do_2, \dots, do_q\}$  – множина потенціальних сигналів управління на виході.

Ідея запропонованого метода полягає у створенні складних структур недетермінованих автоматів з базових модулів уніфікованої структури. Базовий модуль представляють у вигляді функціонального блока (рис.2).

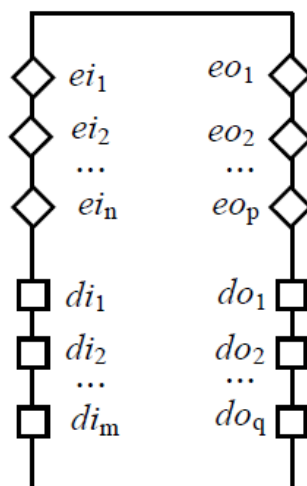


Рис. 2. Інтерфейс модуля ІМНДА

Множина  $\Delta$  переходів між локальними станами автомату:

$$\Delta \subseteq S \times EI \times 2^{DI} \times 2^{DI} \times 2^S \times 2^S \times S. \quad (2)$$

Перехід з одного локального стану в інший  $\delta \in \Delta$ .  $Pr_i(\delta)$  –  $i$ -та координата кортежу  $\delta$ . Тоді  $Pr_1(\delta)$  та  $Pr_7(\delta)$  – вихідний та цільовий стан переходу відповідно;  $Pr_2(\delta)$  – миттєвий вхідний сигнал;  $Pr_3(\delta)$  та  $Pr_4(\delta)$  – множини нульових та одиничних вхідних сигналів управління відповідно;  $Pr_5(\delta)$  та  $Pr_6(\delta)$  – множини дозвільних та заборонних станів автомату відповідно. Робота автомату обмежується наступними виразами:

$$Pr_5(\delta) \cap Pr_6(\delta) = \emptyset \text{ – стан автомату не може бути одночасно "0" та "1";}$$

$Pr_3(\delta) \cap Pr_4(\delta) = \emptyset$  – потенційний сигнал управління на вході повинен бути або одиничним, або нульовим.

Запропонований автомат, так само, як СТ-автомат, поєднує властивості як автомата Мура, так і автомата Мілі (відносно вихідних сигналів).

Структурна ієрархія модульного НДА дозволяє в один момент часу мати кілька дозволених переходів [6]. Перехід  $\delta$  вважається тригерним, коли  $Pr_2(\delta) = \emptyset$ , або форсованим зовнішнім сигналом  $Pr_2(\delta) \neq \emptyset$ , тобто  $Pr_2(\delta) \in EI$ , натомість тригерний перехід завжди активний. Усі активні переходи в автоматах даного типу можуть виконуватися синхронно.

Базові ієрархічні модулі дозволяють створювати комбінації з кількох модулів (складені модулі), або модульні мережі. Таким чином, запропонована структура недетермінованого автомата дозволяє доволі легко розробляти програми для ПЛК на основі LD або FBD мов стандарту ІЕС 61311-3.

Попри те, що модель НДА дозволяє реалізацію дозволених паралельних переходів за певних умов, наприклад, при одночасному читанні і запису стану елемента  $S$ . Для усунення подібних колізій в [7] пропонується двотактна модель НДА. Змінна стану  $S$  розділяється на  $S'$  та  $S''$ . У першому такті формується компонента  $S'_j$  у результаті переходу  $S''_i$  з  $i$ -го у  $j$ -й стан  $S''_i \wedge C_{i,j}$ , де  $C_{i,j}$  – дозвіл цього переходу. У другому такті  $S'_j$  передається на вихід блоку:

$$S'_j = S''_j. \quad (3)$$

Для реалізації запропонованої двотактної моделі НДА мовою LD використовуються релейні структури для моделювання елементів пам'яті, що представляють стан. Відповідно до двокомпонентних побудов стану реалізаційної форми НДА виділяють реле першого ступеня для реалізації перших компонентів станів і реле другого ступеня відповідно для реалізації других компонентів. На рис. 3 приведена загальна схема реалізації базисного модуля ІМНДА на основі комбінування мов LD і FBD.

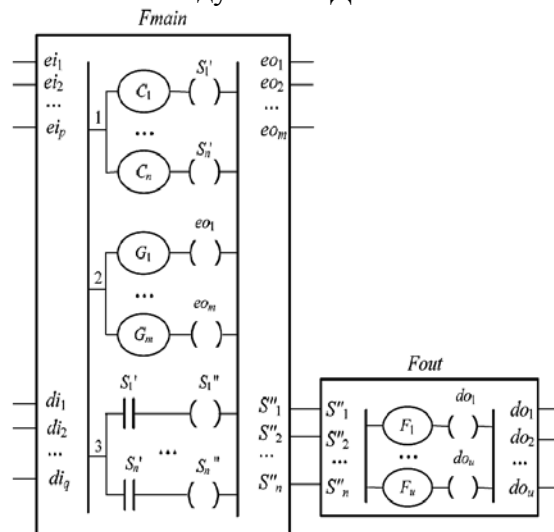


Рис. 3. Загальна схема реалізації базисного модуля ІМНДА.

Модуль складається з двох функціональних блоків  $F_{main}$  і  $F_{out}$ , кожен з яких описується за допомогою LD-діаграм. LD-діаграма, інкапсульована в ФБ  $F_{main}$ , і складається з трьох груп. Перша група формує значення  $S'_j$  першого такту НДА. Макрокола, що обчислюють умови збудження реле  $C_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), позначені на рис. 3 овалами. Обчислення цих умов виконується відповідно до виразу  $S''_i \wedge C_{i,j}$ . Друга група обчислює вихідні значення подієвих ("імпульсних") сигналів  $eo_m$ . Умови переходів  $G_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ) обчислюються наступним чином:

$$G_k = \bigvee_{(S_i, S_j) \in E_k} (S_i'' \wedge C_{i,j}), \quad (4)$$

де  $E_k$  - множина переходів автомата, маркованих сигналом  $eo_k$ .

Третя група здійснює перехід  $S'_j = S''_j$ . Таким чином, на виході  $F_{main}$  маємо значення вихідних сигналів  $eo_m$  та сигналів стану  $S''_j$ .

LD діаграма, інкапсульована в ФБ  $F_{out}$ , обчислює значення вихідних сигналів управління  $do$  на основі компонентів станів  $S''_n$  другого такту. Використовувані макрокола  $F_k$  ( $k = \overline{1, u}$ ) у вигляді паралельно з'єднаних контактів обчислюють функції:

$$F_k = \bigvee_{S_i \in Z_k} S_i'', \quad (5)$$

де  $Z_k$  – множина станів, при активних значеннях яких видається інформаційний сигнал  $do_k$ .

Слід зазначити, що у випадку моделювання дискретного автомата з використанням графів або мереж Петрі безпосереднє застосування мов ІЕС 61131-3 доволі проблематично, тому в роботі [7] запропонована структура інструментальної системи проектування ДПС на основі ІМНДА. Фрагмент запропонованої інструментальної системи приведено на рис. 4.

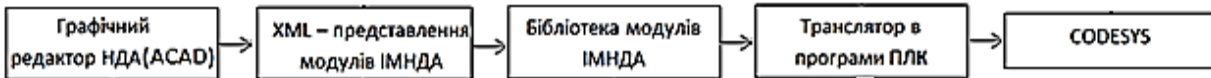


Рис. 4. Фрагмент структури системи підтримки проектування ДПС на основі ІМНДА.

Для формування базового модуля НДА застосовується графічний редактор ACAD. Транслятор XML-Описів ІМНДА в програми для ПЛК призначено для автоматичного перетворення ІМНДА в програми ПЛК, представлені у відповідності зі стандартом PCOpen XML. З метою дослідження властивостей дискретних систем управління, а також застосування їх у навчальному процесі студентів кафедри технічної кібернетики ХНТУ, було розроблено навчально-дослідницький стенд на основі контролера ОВЕН ПЛК63, рис. 5.

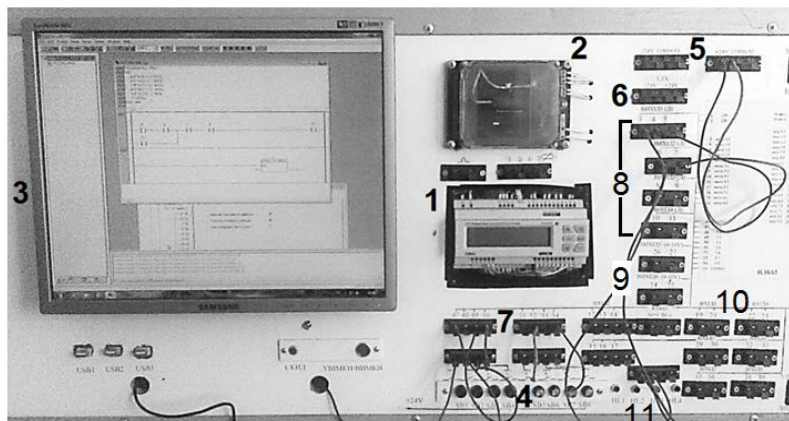


Рис. 5. Лабораторний стенд на базі ПЛК63  
1 – ПЛК63; 2 – ЕП1; 3 – монітор ПК; 4-10 клеми для підключення зовнішніх пристроїв; 11 – світлодіодні індикатори.

Контролер має моноблочну конструкцію з можливістю підключення модуля розширення MP1. Має вісім дискретних і вісім універсальних аналогових входів. Тип аналогового датчика (ТП, ТО, резистивний або активний струми чи напруги) задається програмно. Також контролер має шість виходів, один з яких дискретний, решта – аналогові або дискретні. Окрім самого контролера, стенд обладнаний персональним комп'ютером з необхідним програмним забезпеченням та моделлю об'єкта управління - емулятором печі ЕП1, обладнаним датчиком температури. Характеристики контролера дозволяють використовувати його для управління різноманітними технологічними об'єктами та реалізовувати складні алгоритми програмного управління. Стенд оснащено клемми для швидкого та зручного підключення входів та виходів контролера. Дискретні входи контролера можуть бути підключені до кнопок, що емулюють дискретні сигнали або до дискретних датчиків, які можуть бути встановлені на моделях конвеєрів, підйомників, виконавчих механізмах.

Програмування контролера ПЛК63 здійснюється у середовищі CoDeSys з використанням мов IEC 61131-3:

- структурований текст (ST — Structured Text);
- послідовні функціональні схеми (SFC — Sequential Function Chart);
- діаграми функціональних блоків (FBD — Function Block Diagram);
- релейно-контактні схеми, або релейні діаграми (LD — Ladder Diagram);
- список інструкцій (IL — Instruction List).

Запропонована конфігурація стенду дозволяє виконувати наступні навчальні завдання:

- здобуття навичок програмування на мовах IEC 61131-3 у середовищі CoDeSys\$;
- проектування і дослідження дискретних автоматів;
- проектування і дослідження САР технологічних об'єктів;
- розробка простих SCADA – проектів із застосуванням ПЛК63 і моделей об'єктів, як реальних так і програмних;
- побудова простих мереж Modbus з використанням кількох контролерів і пристроїв вводу/виводу;
- проектування і дослідження релейних схем управління.

#### **Висновки**

Модульна структура ІМНДА має добру сумісність із відомими засобами програмування ПЛК. Запропонована методика дозволяє створювати набори бібліотечних блоків у середовищі розробки програм для ПЛК, наприклад, CODESYS, з подальшим використанням у прикладних програмах контролерів. Особливо просто ієрархічні модулі НДА реалізуються у вигляді функціональних блоків, опис яких можна реалізовувати на мовах LD або ST.

Створення інструментальних систем проектування цифрових автоматів дозволить суттєво підвищити ефективність проектування систем управління на основі ПЛК.

#### **Список використаної літератури**

1. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов / В.М. Глушков. — М.: Физматгиз, 1962. — 476 с.
2. Соловьев В.В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем / В.В. Соловьев. — М.: Горячая линия-Телеком, 2001. — 635с.
3. Полин Е.Л. Абстрактные композиционные автоматы / Е.Л. Полин, К.В. Защелкин // Труды Одесского политехнического университета. — 2006. — Вып. 1 (25). — С. 88-94.

4. Cassandras C.G. Introduction to Discrete Event Systems / C.G. Cassandras, C.S. Lafortune. — Springer, 2008. — 772 с.
5. Вашкевич Н.П. Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки / Н.П. Вашкевич. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2004. — 280 с.
6. Дубинин В.Н. Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов. (Ч. 1. Формальная модель) / В.Н. Дубинин, Д.Н. Дроздов, Д.В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2016. — № 1 (37). — С. 28-39.
7. Дубинин В.Н. Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов. (Ч. 2. Методы и средства) / В.Н. Дубинин, Д.А. Будаговский, Д.Н. Дроздов, Д.В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2016. — № 2 (38). — С. 18-32.

### **References**

1. Glushkov, V. M. Sintez tsifrovyykh avtomatov. Fizmatgiz. Moscow. (1962)
2. Solovev, V. V. Proektirovanie tsifrovyykh sistem na osnove programmirovemykh logicheskikh integralnykh shem. Goryachaya liniya-Telekom. Moscow. (2001)
3. Polin, E. L., Zashelkin, K. V. Abstraktnye kompozitsionnye avtomaty. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. **1** (25), 88-94. (2006)
4. Cassandras, C. G., Lafortune, C. S. Introduction to Discrete Event Systems. Springer. (2008)
5. Vashkevich, N. P. Nedeterminirovannyye avtomaty v proektirovanii sistem parallelnoy obrabotki. Izd-vo PGU. Penza. (2004)
6. Dubinin, V. N., Drozdov, D. N., Artamonov, D. V. Proektirovanie i realizatsiya sistem upravleniya diskretnymi sobytiynymi sistemami na osnove ierarhicheskikh modulnykh nedeterminirovannykh avtomatov (Ch. 1. Formalnaya model). Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tehnicheskie nauki. **1**(37), 28-39. (2016)
7. Dubinin, V. N., Budagovskiy, D. A., Drozdov, D. N., Artamonov, D. V. Proektirovanie i realizatsiya sistem upravleniya diskretnymi sobytiynymi sistemami na osnove ierarhicheskikh modulnykh nedeterminirovannykh avtomatov (Ch. 2. Metody i sredstva). Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tehnicheskie nauki. **2** (38), 18–32. (2016)