

УДК 519.713

В.А. Куланов

*Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## МНОГОВЕРСИОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ИХ СИНТЕЗА

*Рассмотрены уровни и виды автоматной диверсности. Предложена модель абстрактного многоверсионного цифрового автомата. Проведен анализ основных свойств, ограничений и структуры абстрактного многоверсионного цифрового автомата. Предложен метод синтеза многоверсионного цифрового автомата представленного моделями канонического цифрового автомата Мили/Мура различных классов.*

**Ключевые слова:** диверсность, абстрактный многоверсионный цифровой автомат, многоверсионный канонический цифровой автомат, многоверсионный микропрограммный цифровой автомат, МВЦА, синтез.

### Введение

Актуальной проблемой функционирования критических систем при традиционном дублировании или мажоритировании каналов является высокая вероятность их отказа по общей причине (ООП) [1 – 4], который может быть обусловлен:

- неверной интерпретацией спецификации (алгоритма);
- проектными дефектами, внесенными на этапах разработки и не выявленными на этапах тестирования и отладки;
- внешними воздействиями со стороны агрессивной среды (ионизирующее излучение, наводки в цепях связи и т.п.) и др.

Уменьшить риски ООП возможно за счет внесения версионной избыточности [5 – 9]. Для этого используют многоверсионный подход к проектированию, принцип диверсности или разнообразия, сущность которого заключается в разработке и выборе нескольких (двух или более) вариантов реализации (версий) системы, из множества возможных согласно заданным критериям.

В современных системах критического применения наряду с программными компонентами широко используют аппаратные решения (аппаратно реализованные алгоритмы управления и обработки данных), где в качестве элементной базы выступает программируемая логика (ПЛ). В этом случае система представляет собой цифровой автомат (ЦА).

Анализ предметной области показал, что существует ряд проблем, связанных с разработкой многоверсионных систем на ПЛ. Предложенные в работах [10, 11] модели многоверсионных цифровых автоматов (МВЦА) и методы их синтеза в общем случае ориентированы на решение конкретных узкоспециализированных задач в одной определенной области. Это накладывает ограничения на их использование для решения другого класса задач и требует дополнительных временных затрат на доработку со стороны разработчика.

Таким образом, целью статьи является анализ видов и уровней автоматной диверсности, разработка и исследование модели абстрактного многоверсионного цифрового автомата. Разработка метода синтеза многоверсионного канонического цифрового автомата Мили (Мура) различных классов.

### 1. Виды и уровни автоматной диверсности

Под автоматной диверсностью будем рассматривать такой вид многоверсионности, который достигается за счет внесения избыточности на уровне множества автоматных моделей реализации многоверсионных систем. Выходным результатом проектирования в рамках автоматной диверсности является модель многоверсионного цифрового автомата, структура которого зависит от уровня представления версий и видов автоматной диверсности.

В общем случае формирование структуры МВЦА определим на нескольких уровнях (рис. 1).

1. На уровне канально-автоматной диверсности (многоверсионности), когда избыточность достигается в рамках одной автоматной модели и множества вариантов ее синтеза (рис. 1, а).

2. На уровне модельно-автоматной диверсности (многоверсионности), формируемой в рамках множества автоматных моделей, когда версии представлены различными существующими моделями цифровых автоматов (рис. 1, б).

3. На уровне канально-модельной автоматной диверсности (многоверсионности), определяемой множеством автоматных моделей реализации системы и множеством вариантов их синтеза (рис. 1, в).

Для классификации видов автоматной диверсности по степени охвата и глубине воспользуемся предложенным в работе [12] принципом:

- по степени охвата – с полной и частичной версионной избыточностью;
- по уровню (глубине) – с общей и отдельной версионной избыточностью (только для полной версионной избыточности).

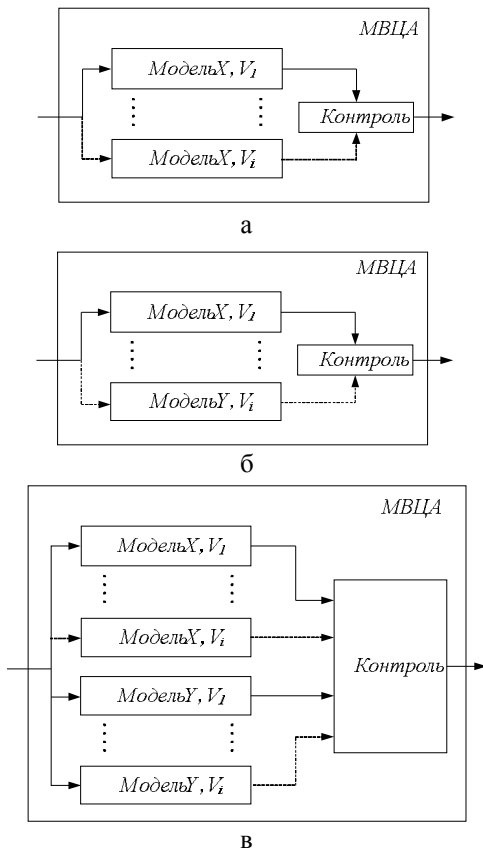


Рис. 1. Уровни автоматной диверсности  
 а – канално-автоматная; б – модельно-автоматная;  
 в – канално-модельная автоматная

Особенности формирования структур многоверсионных цифровых автоматов с учетом рассмотренных видов автоматной диверсности представлены на рис. 2.

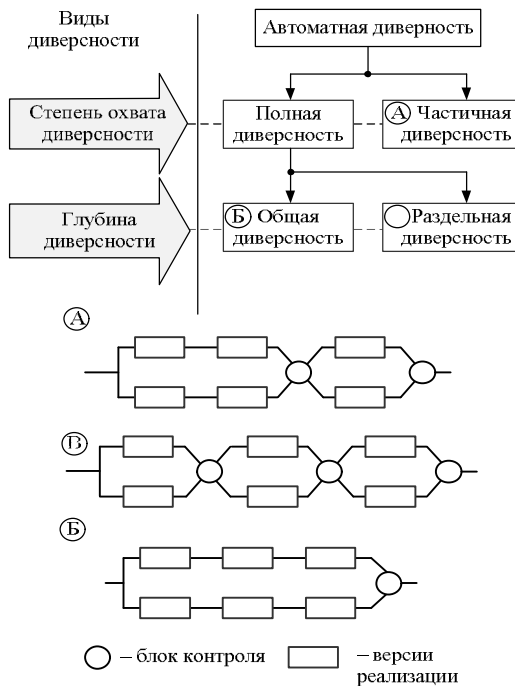


Рис. 2. Виды автоматной диверсности по степени охвата и глубине с учетом структур цифровых автоматов

Таким образом, формирование модели МВЦА на уровне канално-автоматной избыточности зависит от соответствующей одноверсионной модели ЦА (канонического, микропрограммного и т.д.) и соответствующего множества сочетаний по рассмотренным классификационным признакам.

Для модельно-автоматной, равно как и для канално-модельной автоматной избыточности множество сочетаний по рассмотренным признакам ограничено, ввиду сложности согласования работы версий, представленных различными моделями цифровых автоматов. В этом случае, чаще всего, модель автомата формируется по принципу МВЦА с полной общей диверсностью. При этом необходимо принять ряд дополнительных мер по организации синхронной работы каналов системы, чтобы исключить ложное срабатывание средств контроля. Чаще всего это решается за счет введение дополнительных состояний, промежуточных узлов памяти и т.д.

## 2. Модель абстрактного многоверсионного цифрового автомата

На основании рассмотренных классификационных признаков и видов автоматной диверсности представим модель абстрактного многоверсионного цифрового автомата. В общем виде структуру многоверсионного цифрового автомата  $A_{МВЦА}$  определим множеством версий реализации резервных каналов – одноверсионных моделей цифровых автоматов  $A_i$  и функцией обработки результатов работы версий  $\psi: \{W^i\} \rightarrow W_t$ , где  $W^i$  – множество выходных результатов (выходной алфавит) соответствующих  $i$ -ых версий реализации (рис. 3).

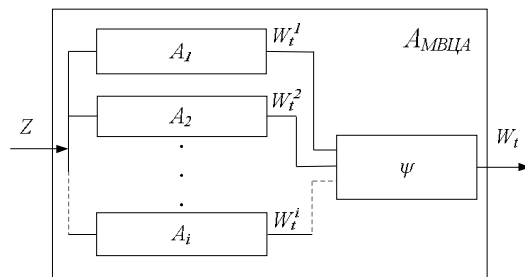


Рис. 3. Структура МВЦА

Функция  $\psi$  может реализовывать любую функцию контроля и описывать операцию мажоритарного голосования (кодowego, арифметического, медианного и др.) или более сложную операцию, учитывающую особенности выбора версий с учетом различных вариантов адаптации систем к отказам.

На уровне многоверсионного цифрового автомата  $A_{МВЦА}$  автоматная модель  $A_i$  соответствующей  $i$ -й версии представлена классическим цифровым автоматом, который задается таким выражением:

$$A_i = \{s_0^i, \varphi_i, \lambda_i, Z, W_t^i, S^i\}, \quad (1)$$

где  $Z$  – входной алфавит, общий для всех версий;  $W_t^i$  – выходной результат (выходной алфавит) соответствующей  $i$ -й версии реализации канала (автоматной модели);  $S^i$  – множество состояний  $i$ -й модели автомата;  $\varphi_i$  и  $\lambda_i$  – функции переходов и выходов соответственно  $i$ -ой автоматной модели, где  $\varphi_i : S^i \times Z \rightarrow S^i$ ,  $\lambda_i : S^i \times Z \rightarrow W_t^i$ ;  $s_0 = \{s_0^1, \dots, s_0^n\}$  – начальное состояние соответствующих  $i$ -х версий в составе МВЦА.

На основании выражения (1) представим модель абстрактного многоверсионного цифрового автомата, которая имеет следующий вид:

$$A_{\text{МВЦА}} = \{ \{A_i\}_{i=1}^n, Z, \psi, W_t, s_0, t \}, \quad (2)$$

где  $\{A_i\}_{i=1}^n$  – множество моделей одноверсионных цифровых автоматов (версий реализаций) в составе МВЦА,  $i = \overline{1, n}, n \geq 2$ ;  $\psi$  – функция формирования результатов работы версий (каналов);  $W_t$  – выходной алфавит МВЦА, формируемый функцией  $\psi$  на основании выходных данных каждого из каналов (версий), т.е.  $W_t = (W_t^i)$ ;  $s_0$  – начальное состояние МВЦА;  $t$  – дискретное автоматное время, которое определяет моменты перехода автомата из одного состояния в другое. Функции переходов  $\varphi_i$  и выходов  $\lambda_i$  для моделей МВЦА определяются соответствующей одноверсионной моделью цифрового автомата.

Многоверсионный цифровой автомат, описываемый моделью (2) обладает следующими свойствами:

1. МВЦА относится к классу конечных цифровых автоматов.
2. Функция  $\psi$  представлена комбинационным автоматом или автоматом с памятью, если существ-

ует необходимость в дополнительной синхронизации работы каналов (версий).

3. Все одноверсионные модели  $A_i$  в составе МВЦА относятся к классу эквивалентных, т.е. имеют одинаковый входной  $Z$  и выходной  $W$  алфавит, а также их реакция из исходного состояния на любое входное слово совпадает.

4. Пусть  $A_i$  и  $A_j$  – соответствующие одноверсионные модели в составе многоверсионного цифрового автомата  $A_{\text{МВЦА}}$ , тогда:

если  $\varphi_i = \varphi_j$ , тогда  $\lambda_i = \lambda_j$ ; если  $\varphi_i \neq \varphi_j$ , тогда  $\lambda_i \neq \lambda_j$ .

В общем случае количество состояний  $S^i$  для соответствующих одноверсионных моделей  $A_i$  в составе МВЦА должно быть одинаковым. В противном случае необходимо принимать меры по синхронизации работы каналов (версий). На практике это можно реализовать за счет применения специальных флагов событий или механизма конвейеризации, а также введения дополнительных элементов памяти (триггеров, регистров и т.д.) на выходе соответствующих каналов МВЦА. При этом количество элементов памяти в выходной цепочке определяет дискретные моменты времени  $t$ , на которые необходимо задержать выдачу информации на блок сравнения. В рамках абстрактного синтеза это приведет к появлению дополнительных промежуточных состояний для соответствующей автоматной модели  $A_i$ .

Функция  $\psi$  в зависимости от решаемой задачи, может быть представлена комбинационным узлом (мажоритарный элемент, схемы сравнения и т.д.), либо реализовывать более сложную логику принятия решений.

На основании предложенной модели абстрактного многоверсионного цифрового автомата (2) формируются два класса моделей – многоверсионный канонический цифровой автомат (МВКА) и много-

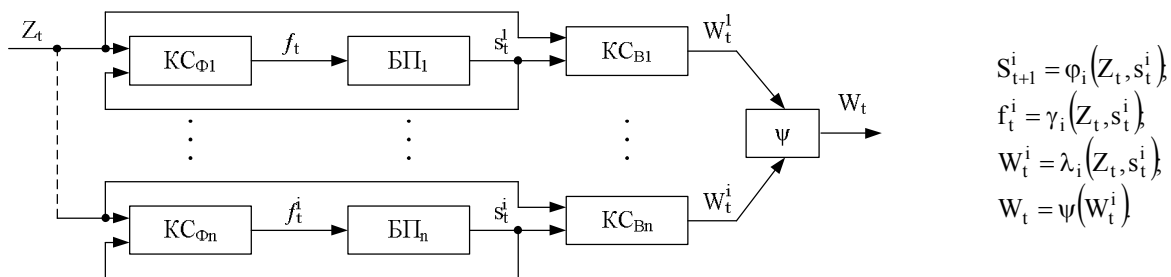


Рис. 4. Структура МВКА Мили класса А с полной общей диверсностью

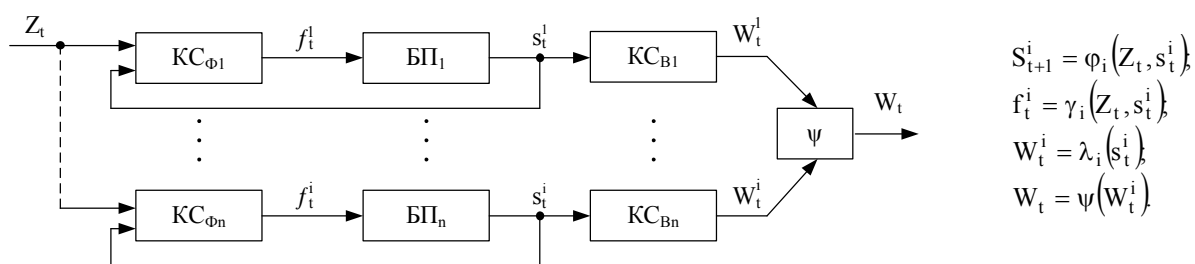


Рис. 5. Структура МВКА Мура класса В с полной общей диверсностью

версионный микропрограммный цифровой автомат (МВМПА). На рис. 4, 5 представлены структурные модели МВКА Мила класса А и МВКА Мура класса В с полной общей диверсностью соответственно.

Формирование данных моделей проводится на уровне канально-автоматной диверсности (рис. 1, а п. 1). Здесь БП<sub>і</sub> – блок памяти і-й версии, КСФ<sub>і</sub> – комбинационная схема і-й версии, формирующая сигналы возбуждения элементов памяти, КСв<sub>і</sub> – комбинационная схема і-й версии, формирующая выходные сигналы. Количество возможных вариантов моделей МВЦА в рамках заданной канонической модели определяется полным множеством допустимых сочетаний по рассмотренным в п. 1 (рис. 2) классификационным признакам диверсности – полная общая, полная раздельная и частичная.

Отметим, что для построения моделей МВЦА с модельно-автоматной и канально-модельной автоматной диверсностью необходимо чтобы все версии реализации, т.е. одноверсионные цифровые автоматы в составе МВЦА относились к одному классу или строились по принципу МВЦА с полной общей диверсностью.

### 3. Метод синтеза многоверсионного канонического цифрового автомата

Рассмотрим основные этапы синтеза многоверсионного канонического цифрового автомата. Непосредственно процессу синтеза предшествует выбор соответствующей автоматной модели, т.е. определяется закон функционирования ЦА (Мили, Мура), а также задаются уровни и виды автоматной диверсности (см. п. 1). После чего выполняется синтез, этапы которого с соответствующими возможными вариантами внесения избыточности представлены в табл. 1.

В общем виде этапы синтеза МВКА соответствует классическому подходу с учетом особенностей генерации множества решений на каждом шаге:

#### 1. Абстрактный синтез:

1.1. Определение входного Z, выходного W и алфавита состояний S<sup>і</sup> соответствующих і-х версий.

1.2. Построение функций переходов φ<sub>і</sub> и выходов λ<sub>і</sub> для соответствующих і-х версий по заданному алфавиту.

1.3. Минимизация количества состояний S<sup>і</sup> соответствующих і-х версий.

#### 2. Структурный синтез:

2.1. Кодирование внутренних состояний S<sup>і</sup> соответствующих і-х версий.

2.2. Выбор элементов памяти автоматов для соответствующих і-х версий.

2.3. Выбор функционально-полной системы элементов для соответствующих і-х версий.

2.4. Построение уравнений булевых функций выходов λ<sub>і</sub> и возбуждения γ<sub>і</sub> соответствующих і-х версий.

2.5. По полученным аналитическим выражениям построение функциональных схем соответствующих і-х версий.

#### 3. Синтез блока контроля.

Синтез блока контроля зависит от сложности реализуемой функции (схема сравнения, мажоритарный элемент и т.п.), которая может быть представлена последовательностным или комбинационным узлом.

Таблица 1  
Варианты внесения избыточности на этапах синтеза МВКА

№	Варианты избыточности
1. Абстрактный синтез	
1.1	-----
1.2	Множество методов представления автоматов (таблицы, графы, матрицы, регулярные выражения и т.д.)
1.3	Множество методов и алгоритмов минимизации состояний (метод Хаффмана; алгоритм Хопкрофта; алгоритм Мура; алгоритм Саркара, Вашу и Хандхури; алгоритм Гинзбурга; метод Полла и Ангера; метод Келла; алгоритм Ауфенкампа и Хона и т.д. [13 - 19]).
2. Структурный синтез	
2.1	Множество методов кодирования внутренних состояний (логарифмическое кодирование; унитарное (единичное) кодирование; двоичное кодирование; многозначное кодирование; эвристический алгоритм кодирования; кодирование в коде Грея и Джонсона и т.д. [13 - 19]).
2.2	Множество типов элементов памяти (D-, JK-, RS-, T- триггеры)
2.3	Множество функционально-полных базисов реализации («И, ИЛИ, НЕ»; «И-НЕ»; «ИЛИ-НЕ»)
2.4	Множество методов минимизации комбинационных функций (алгоритм ESPRESSO; метод карт Карно; метод Квайна–Мак-Класки; метод Блейка–Порецкого; алгоритм Рота; метод Петрика; метод Харриса; метод неопределенных коэффициентов и т.д. [13 - 19])
2.5	-----
3. Синтез блока контроля	

Отметим, что степень разнообразия и количество получаемых решений зависит от соответствующего этапа. На некоторых из них внесение избыточности может быть невозможным (этапы 1.1, 2.5) или иметь ограниченное влияние (этапы 1.2, 2.3). Например, базис реализации (этап 2.3) для проектов на ПЛИС класса FPGA задает избыточность исключительно на уровне ввода проекта и не влияет на результаты, полученные на выходе средств синтеза современных систем автоматизированного проектирования (САПР). Это обусловлено архитектурой программируемой логики класса FPGA, где в качестве основного "строительного блока" выступает табличный функциональный преобразователь типа LUT (Look-Up Table). Этап 1.2 также не влияет на формирование структурной модели многоверсионного цифрового автомата, но позволяет уменьшить возможное количество проектных ошибок на этапе его ввода.

## Выводы

В статье рассмотрены основные уровни и виды автоматной диверсности, предложена модель абстрактного многоверсионного цифрового автомата, на основании которой формируются модели многоверсионного канонического автомата и многоверсионно-микропрограммного автомата различных классов.

Установлено, что внесение версионной избыточности в автоматные модели возможно на нескольких уровнях: канално-автоматный, модельно-автоматный, канално-модельная автоматный. Для каждого из уровней сформулированы ограничения и особенности формирования моделей. По видам автоматная диверсность, с точки зрения степени охвата и глубине, бывает частичной, полной общей и полной раздельной.

В статье предложен метод синтеза многоверсионного канонического цифрового автомата. Рассмотрены варианты внесения избыточности на каждом из его этапов. Установлено, что в общем виде процесс разработки МВКА соответствует этапам канонического метода структурного синтеза с учетом вариантов внесения избыточности.

Направлением дальнейших исследований является анализ и оценка применения различных структурных моделей многоверсионных цифровых автоматов в проектах на ПЛИС класса FPGA.

## Список литературы

1. Hokstad, P. *Common cause failure modeling: status and trends* / P. Hokstad, M. Rausand // *Handbook of performance engineering* (Ed. Misra K. B.). – 2008. pp. 621–640.
2. Mitra, S. *Common-mode failures in redundant VLSI systems: a survey* / S. Mitra, N.R. Saxena, J. McCluskey // *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 49, No. 3, 2000. pp. 285–295.
3. Tamir, Y. *Reducing common mode failures in duplicate modules* / Y. Tamir, C. H. Sequin // *International Conference on Computer Design*. Port Chester. NY. 1984. pp. 302–307.
4. Mitra, S. *Design of Redundant Systems Protected Against Common-Mode Failures* / S. Mitra, J. McCluskey // *19th IEEE VLSI Test Symposium (VTS'01)*, Los Angeles (CA). 2001. pp. 190–195.
5. *Diversity Strategies for NPP I&C Systems* / R. Wood, R. Belles, M. Cetiner & et al. // *NUREG/CR-7007 ORNL/TM-2009/302*. 2009.

6. *Нормативне положення "Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних і керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій"*. НП 306.5.02/3.035-2000. – К., 2000.

7. Avizienis, A. *Fault Tolerance by Design Diversity: Concepts and Experiments* / A. Avizienis, J. P. J. Kelly // *IEEE Computer*. 1984. pp. 67–80.

8. Littlewood, B. *The Impact of Diversity upon Common Mode Failures* / B. Littlewood // *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51. No. 1. 1996. –P. 101–113.

9. Wood, R. *Diversity Approaches for Common Cause Failure Mitigation* / R. T. Wood // *IAEA Technical Meeting on Integrating Analog and Digital I&C Systems in Hybrid Main Control Rooms at Nuclear Power Plants*. Toronto. Canada. 2007.

10. Харченко, В.С. *Абстрактные модели и элементы синтеза многоверсионных автоматов [Текст]* / В.С. Харченко, В.В. Тарасенко // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – №7(19). – С. 52–55.

11. Скляр, В.В. *Метод разработки многоверсионных информационно-управляющих систем на базе автоматов с программируемой логикой* / В.В. Скляр // *Радиоэлектрон. і комп'ютерні системи*. – 2008, №7. С. 70-75.

12. Тарасенко, В. *Методы структурно-версионного резервирования и средства реализации отказоустойчивых бортовых цифровых систем управления с программируемой логикой [Текст]* : дис... канд. техн. наук: 05.13.03 / Тарасенко Виталий Владимирович ; Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2003. – 339 с.

13. Глушков, В. М. *Синтез цифровых автоматов* / В.М. Глушков – М.: Физматгиз, 1962. – 476 с.

14. Глушков, В.М. *Теория автоматов и вопросы проектирования структур цифровых машин* / В.М. Глушков // *Кибернетика*. – 1965. – №1. – С. 3–11.

15. Кобринский, Н.Е. *Введение в теорию конечных автоматов* / Н. Е. Кобринский, Б. А. Трахтенброт. – М.: Физматгиз. – 1962. – 404 с.

16. Phister, M. *Logical Design of Digital Computers* / M. Phister. – John Willey and Sons, New York. – 1958. – 408 p.

17. Баранов, С.И. *Синтез микропрограммных автоматов (граф-схемы и автоматы)* / С.И. Баранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1979. – 232 с.

18. Баркалов, А.А. *Синтез композиционных микропрограммных устройств управления* / А.А. Баркалов, Л.А. Титаренко. – Х.: Коллегиум, 2007. – 304 с.

19. Баркалов, А.А. *Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах* / А.А. Баркалов. – Д.: ДонГТУ, 2002. – 262 с.

Поступила в редколлегию 26.08.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## БАГАТОВЕРСІЙНІ ЦИФРОВІ АВТОМАТИ ТА ЕЛЕМЕНТИ ЇХ СИНТЕЗУ

В.О. Куланов

Розглянуто рівні та види автоматної диверсності. Запропонована модель абстрактного багатOVERсійного цифрового автомату. Проведено аналіз основних властивостей, обмежень і структури абстрактного багатOVERсійного цифрового автомату. Запропоновано метод синтезу багатOVERсійного цифрового автомату представленого моделями канонічного цифрового автомату Мілі/Мура різних класів.

**Ключові слова:** диверсність, абстрактний багатOVERсійний цифровий автомат, багатOVERсійний канонічний цифровий автомат, багатOVERсійний мікропрограмний цифровий автомат, БВЦА, синтез.

## MULTI-VERSION DIGITAL AUTOMATAS AND THE ELEMENTS OF THEIR SYNTHESIS

V.A. Kulanov

The levels and types of automata diversity were considered. The model of abstract multi-version digital automata was proposed. The main properties, restrictions and structure of abstract multi-version digital automata were analyzed. The method of synthesis of abstract multi-version digital automata based on canonical models of Mealy/Moore machines was proposed.

**Keywords:** diversity, abstract multi-version digital automata, multi-version canonical digital automata, multi-version microprogram digital automata, MVDA, synthesis.