

АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО КЛЮЧА

О.П. Алымов, канд.техн.наук, **Ю.Е. Кулешов**, канд.техн.наук, **А.А. Головки**, канд.техн.наук
Киевский национальный университет технологий и дизайна,
ул. Немировича-Данченко, 2, Киев, 01011, Украина.

Синтезирована автоматная модель поведения тиристорного ключа, все компоненты которой заданы явно, позволяющая формализовать логический синтез цифровой системы управления электрического преобразователя с последующей ее реализацией либо программно на основе МП-средств, либо аппаратно с использованием БИС программируемой логики. Библ. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: автоматная модель, тиристорный ключ, структурный синтез.

Введение. Существуют два основных направления технического совершенствования электрических полупроводниковых преобразователей: оптимизация силовой схемы и управление ключевыми элементами электрических преобразователей. В настоящее время возможности первого направления известны и широко используются. Второе направление связывают с решением задач управления электрическими преобразователями на основе таких современных программируемых средств цифровой микроэлектроники как микропроцессорные системы (МПС), реализующие программный метод интерпретации алгоритмов управления, так и больших интегральных схем программируемой логики (БИС ПЛ), реализующих аппаратную или структурную интерпретацию алгоритма управления [1,2,3,10]. Сегодня, в силу своих преимуществ, все большее распространение получают методы на основе автоматного подхода создания систем управления электрическими преобразователями [2,3,4]. Основные положения данного подхода, позволяющего перейти к инженерии программирования с использованием автоматного стиля программирования, изложены в работах [5,6]. Следует особо отметить, что автоматный подход предполагает заданными априори автоматные модели поведения как самого объекта управления, так и управляющего устройства. Однако этап построения данных моделей и составляет основную трудоемкость построения автоматных программ [5].

Располагая автоматной моделью управляемого объекта, легко выявить задачи, решаемые управляющим устройством, в зависимости от условий функционирования управляемого объекта, свойств поступающей от него информации и характера представляющей его модели. Кроме того, решение задачи синтеза цифрового управляющего устройства в этом случае сводится к нахождению автоматной модели, обратной по отношению к автоматной модели управляемого объекта. Целесообразность такого решения задачи синтеза цифрового управляющего устройства определяется тем, что, во-первых, более естественно и более экономично по времени производить поиск управляющих воздействий для достижения заданных целей управления, опираясь именно на последние, и, во-вторых, такой путь позволяет формализовать процесс синтеза устройства управления, который будет сводиться в этом случае к процессу обращения автоматной модели управляемого объекта.

Сегодня главенствующее положение в проектировании систем управления электрическими преобразователями занимают интуитивно-эвристические методы с привлечением на отдельных этапах аппарата формализации, направленного на получение на основе таблиц истинности логических выражений в виде дизъюнктивных и конъюнктивных нормальных форм с последующей их минимизацией аналитическими и графическими (карты Карно) методами. При этом предполагается заданным априори закон функционирования разрабатываемой системы управления электрическим преобразователем, отражающий зависимость управляющих слов от текущих значений параметров управляемого объекта и заданной цели управления. Результатом проектирования является структурно или программно реализованный автомат, функционирующий в соответствии с заданным законом управления [2,3]. К недостаткам интуитивно-эвристических методов относят следующие: получение высококачественного проекта возможно узким кругом высококвалифицированных специалистов; удачные методики и технологии проектирования являются “достоянием” личности, их невозможно тиражировать даже при желании автора; остается неизвестной относительная ценность полученного решения, так как не найдены лучшие из возможных вариантов решения.

Формальные методы, представляющие собой мощное средство для разработки программных систем, позволяют создавать функциональные спецификации и модели архитектуры систем, а также осуществлять их преобразование в программы с последующей верификацией (проверкой правильности). Корректность полученных результатов гарантируется математическим аппаратом, опирающимся на достижения алгебры логики и дискретной математики [7]. Кроме того, математические методы и построенные на них математические модели в совокупности с формализованным описанием технологии проектирования составляют и математическое, и методическое обеспечение любой системы автоматизированного проектирования [8,9].

Однако формальные методы сегодня не находят применения при разработке цифровых систем управления электрическими преобразователями по ряду объективных причин, одной из которых является отсутствие общего подхода к синтезу автоматной модели поведения электрического преобразователя.

Автоматные модели поведения одного и того же полупроводникового электрического преобразователя, выполненного на транзисторах или с использованием тиристоров, существенно различны и определяются автоматными моделями поведения используемых ключей.

Построение и анализ какой-либо автоматной модели поведения тиристорного ключа в доступных литературных источниках выявлено не было. Лишь косвенно можно говорить о том, что автоматная модель поведения этого ключа содержит два состояния, так как тиристор имеет присущий триггерный эффект.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является синтез автоматной модели поведения тиристорного ключа, все компоненты которой будут заданы явно, что позволит не только синтезировать автоматную модель поведения тиристорного преобразователя, но и использовать ее, во-первых, для формального логического синтеза цифровой системы управления преобразователем с последующей реализацией ее на основе автоматного стиля программирования средствами современной цифровой микроэлектроники, и, во-вторых, создать математическое и методическое обеспечение автоматизированной системы проектирования цифровых систем управления электрическими преобразователями.

Результаты исследований. Автоматное описание ключа будем строить в виде ориентированного графа, вершины которого (внутреннее состояние автомата) отметим состояниями выхода ключа (открытое или закрытое), а ребра – состояниями входа ключа, под действием которых происходит данный переход. Такой подход к синтезу конечно-автоматной модели поведения ключа позволяет однозначно в явном виде определить все компоненты этой модели.

Примем следующие основные допущения при синтезе конечно-автоматной модели поведения ключа.

1. Входные воздействия и выходные реакции ключа, число которых конечно, формируются в дискретные такты времени.
2. Каждому воздействию, появившемуся на входах ключа, и только ему должна соответствовать выходная реакция в этот (или следующий за ним) такт времени.
3. Длительность входных сигналов достаточна для переключения ключа из одного состояния в другое.
4. Структурный синтез автоматной модели поведения ключа выполнен с использованием в качестве элементарных автоматов логических элементов И, ИЛИ, НЕ и автомата памяти на основе RS-триггера. Входные и выходные сигналы структурного автомата описываются двоичным алфавитом.

В однооперационных тиристорах (SCR-типа) по цепи управляющего электрода осуществимо только отпирание тиристора. С этой целью на управляющий электрод подается положительный относительно катода импульс напряжения. Запирание однооперационного тиристора производится по цепи анода изменением полярности напряжения анод-катод. Двухоперационные тиристоры (GTO, HD GTO, GCT, IGCT-типа) допускают по цепи управляющего электрода как отпирание, так и запирание прибора. Для запирания на управляющий электрод подается отрицательный импульс напряжения. Все вышесказанное позволяет в тиристорном ключе независимо от его вида выделить один силовой и два управляющих входа. Силовым входом тиристора, куда подают коммутируемые им входные ток или напряжение, служит его анод. В качестве первого управляющего входа тиристора выступает его управляющий электрод в момент подачи на него положительного относительно катода импульса напряжения с целью перевода тиристора в открытое состояние. Ко второму управляющему входу тиристора следует отнести его управляющий электрод в момент подачи на него отрицательного импульса напряжения и цепь анода тиристора в момент изменения полярности напряжения анод-катод с целью перевода тиристора в закрытое состояние. Катод тиристора, куда в открытом его состоянии поступают коммутируемые им входные ток или напряжение, определим как выход тиристорного ключа.

Введем следующие обозначения: x_1 – первый управляющий входной сигнал, подаваемый на первый управляющий вход тиристора (импульс положительного напряжения в цепи “управляющий электрод-катод” тиристора, переводящий тиристор в открытое состояние); x_2 – второй управляющий входной сигнал, подаваемый на второй управляющий вход тиристора (импульс отрицательного напряжения в цепи “управляющий электрод-катод” тиристора и отрицательное напряжение в цепи “анод-катод” тиристора, которые обеспечивают перевод тиристора в закрытое состояние); Y_1 – силовой входной сигнал (коммутируемые тиристором входные ток или напряжение); k_1 – сигнал отсутствия на выходе тиристорного ключа коммутируемых им входных тока или напряжения (первый выходной сигнал); k_2 – сигнал наличия на выходе тиристорного ключа коммутируемых им входных тока или напряжения (второй выходной сигнал).

Автоматную модель поведения тиристорного ключа представим в виде графа конечного автомата Мура (рис. 1).

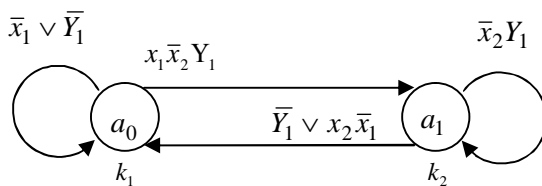


Рис. 1

Этот граф состоит из двух вершин a_0 и a_1 , определяемых отсутствием или наличием на выходе тиристорного ключа коммутируемых входных тока или напряжения. Если тиристорный ключ находится в состоянии a_0 , то на его входах возможны в общем случае восемь комбинаций входных сигналов:

$$\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{Y}_1, \bar{x}_1\bar{x}_2Y_1, \bar{x}_1x_2\bar{Y}_1, \bar{x}_1x_2Y_1, x_1\bar{x}_2\bar{Y}_1, x_1\bar{x}_2Y_1, x_1x_2\bar{Y}_1, x_1x_2Y_1.$$

Так как первые пять и седьмая комбинации входных сигналов не обеспечивают наличие коммутируемых тиристором выходных тока или напряжения, т.е. ими не обеспечивается переход из состояния a_0 в состояние a_1 , при этом восьмая комбинация входных сигналов является для тиристорного ключа запрещенной. Ребро, имеющее вид петли и охватывающее вершину a_0 , обозначим следующим выходным сигналом:

$$\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{Y}_1 \vee \bar{x}_1\bar{x}_2Y_1 \vee \bar{x}_1x_2\bar{Y}_1 \vee \bar{x}_1x_2Y_1 \vee x_1\bar{x}_2\bar{Y}_1 \vee x_1\bar{x}_2Y_1 \equiv \bar{x}_1 \vee \bar{Y}_1.$$

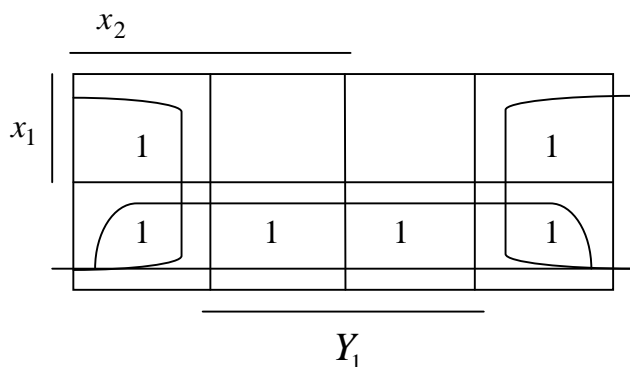


Рис. 2

Минимизация приведенного логического выражения выполнена с помощью карты Карно (рис. 2).

Шестая комбинация входных сигналов $x_1\bar{x}_2Y_1$ обеспечивает наличие коммутируемых тиристором тока или напряжения на его выходе, т.е. она обеспечивает переход из состояния a_0 в состояние a_1 с формированием выходного сигнала k_2 .

В состоянии a_1 , что соответствует открытому состоянию ключа, при поступлении

комбинации входных сигналов $\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{Y}_1, \bar{x}_1x_2\bar{Y}_1, \bar{x}_1x_2Y_1, x_1\bar{x}_2\bar{Y}_1, x_1x_2\bar{Y}_1$ на выходе тиристорного ключа коммутируемые им входные ток или напряжение будут отсутствовать, т.е. произойдет переход из состояния a_1 в состояние a_0 с формированием выходного сигнала k_1 . Ребро, соответствующее данному переходу на графе, следует обозначить таким образом:

$$\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{Y}_1 \vee \bar{x}_1x_2\bar{Y}_1 \vee \bar{x}_1x_2Y_1 \vee x_1\bar{x}_2\bar{Y}_1 \vee x_1x_2\bar{Y}_1 \equiv \bar{x}_1x_2 \vee \bar{Y}_1.$$

Минимизация данного логического выражения произведена с помощью карты Карно и показана на рис. 3.

Комбинации входных сигналов $\bar{x}_1\bar{x}_2Y_1$ и $x_1\bar{x}_2Y_1$ не оказывают никакого влияния на коммутируемые тиристорным ключом входные ток и напряжение, если он находится в открытом состоя-

нии. Это обстоятельство на графе конечно-автоматной модели отражено ребром в виде петли, охватывающей вершину a_1 , и которое отмечено входным сигналом $\bar{x}_1\bar{x}_2Y_1 \vee x_1\bar{x}_2Y_1 \equiv \bar{x}_2Y_1$.

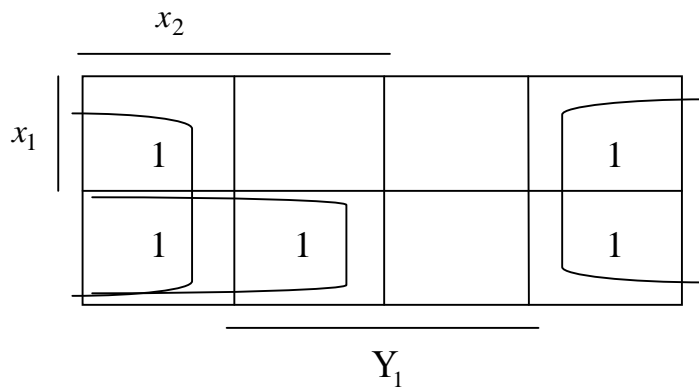


Рис. 3

вершиной, на все дуги, входящие в эту вершину. На рис. 4 показан граф автоматной модели тиристорного ключа на основе автомата Мили, эквивалентный автоматной модели этого ключа на основе автомата Мура.

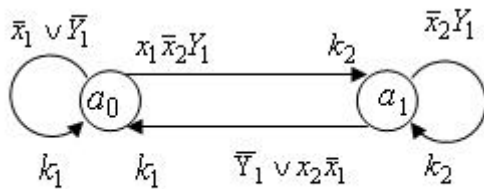


Рис. 4

ний. В таком случае состояния автомата можно кодировать произвольным образом, в частности, кодами минимальной длины.

Конечный автомат, описывающий поведение тиристорного ключа (рис. 4), имеет два состояния, для кодирования которых необходим $n = \log_2 2 = 1$ триггер P_1 . Закодируем состояние автомата следующим образом: $a_0 = 0, a_1 = 1$.

Для построения функций возбуждения и выходов используем структурную таблицу автомата (таблица), которая содержит коды состояний и перечень сигналов возбуждения, формируемых на переходе (a_i, a_j) .

Переходы	Исходное состояние	Код исходного состояния	Следующее состояние	Код следующего состояния	Входной набор	Выходн. набор	Сигналы возбуждения
1	a_0	0	a_0	0	$\bar{x}_1 \vee \bar{Y}_1$	k_1	-
2	a_0	0	a_1	1	$x_1\bar{x}_2Y_1$	k_2	S
3	a_1	1	a_1	1	\bar{x}_2Y_1	k_2	-
4	a_1	1	a_0	0	$\bar{Y}_1 \vee x_2\bar{x}_1$	k_1	R

В столбце сигналов возбуждения укажем сигнал S, если триггер P_1 на переходе (a_i, a_j) переключается из состояния “0” в состояние “1”, и сигнал R, если триггер P_1 переключается из состояния “1” в состояние “0”.

На основе данных таблицы построим каноническую систему функций выхода и возбуждения:

$$k_2 = a_0x_1\bar{x}_2Y_1 \vee a_1\bar{x}_2Y_1 = \bar{x}_2Y_1(a_0x_1 \vee a_1) = \bar{x}_2Y_1(a_1 \vee x_1) \quad \text{ибо} \quad a_0 = \bar{a}_1; \quad (1)$$

$$k_1 = a_0(\bar{x}_1 \vee \bar{Y}_1) \vee a_1(\bar{Y}_1 \vee x_2 \bar{x}_1) = a_0 \bar{x}_1 \vee a_0 \bar{Y}_1 \vee a_1 \bar{Y}_1 \vee a_1 x_2 \bar{x}_1 =$$

$$= \bar{x}_1(a_0 \vee a_1 x_2) \vee a_0 \bar{Y}_1 \vee a_1 \bar{Y}_1 = \bar{x}_1(a_0 \vee x_2) \vee \bar{Y}_1; \quad (2)$$

$$S = a_0 x_1 \bar{x}_2 Y_1, \quad R = a_1(\bar{Y}_1 \vee x_2 \bar{x}_1). \quad (3)$$

Введем промежуточные переменные c_1 и c_2 , синхронизирующие двухступенчатую память синтезируемой логической схемы конечно-автоматной модели тиристорного ключа

$$c_1 = \bar{x}_1 x_2 \vee \bar{Y}_1, \quad c_2 = x_1 \bar{x}_2 Y_1. \quad (4)$$

Тогда с учетом промежуточных переменных c_1 и c_2 функции возбуждения примут следующий вид:

$$S = a_0 c_2, \quad R = a_1 c_1. \quad (5)$$

Для построения комбинационной части синтезируемой схемы используются выражения (1)–(5). Полная синтезированная схема конечного автомата, моделирующего поведение тиристорного ключа с помощью конечно-автоматных функций, показана на рис. 5.

Заключение. Синтезированная автоматная модель поведения тиристорного ключа представляет собой автомат, число состояний которого равно двум. Выходные сигналы и функции возбуждения структурного автомата, моделирующего поведение тиристорного ключа, выполненного на элементах булева базиса и RS-триггерах, описываются системой логических уравнений (1)–(5).

Синтезированную автоматную модель поведения тиристорного ключа, все компоненты которой заданы явно, целесообразно использовать для синтеза автоматной модели поведения тиристорного преобразователя, все компоненты которого также будут заданы явно. Данное обстоятельство позволит, во-первых, провести формально логический синтез цифровой системы управления преобразователя с последующей реализацией ее на основе автоматного стиля программирования средствами современной цифровой микроэлектроники, и, во-вторых, создать математическое и методическое обеспечение автоматизированной системы проектирования цифровых систем управления электрическими преобразователями.

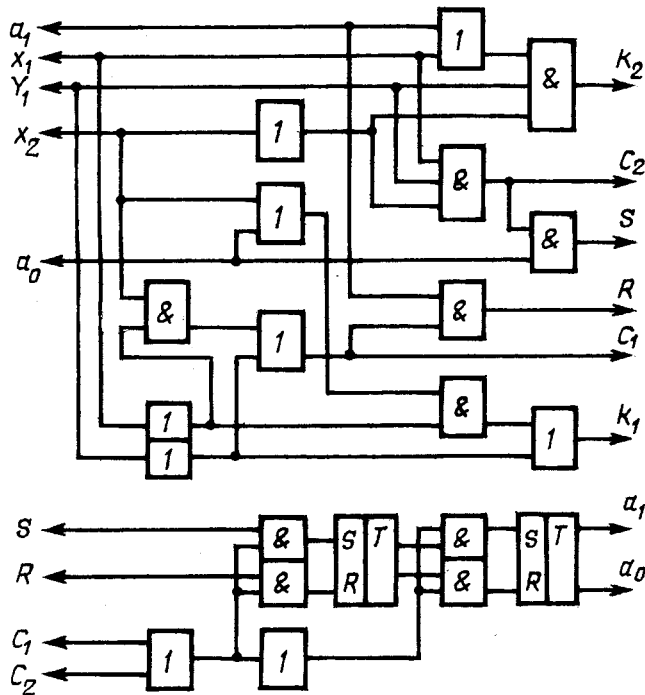


Рис. 5

1. Гладштейн М. Применение микроконтроллеров и DSP-процессоров для управления устройствами силовой электроники // Электронные компоненты. – 2008. – №7. http://old.elgrad.net/intresting_stat-103.html.
2. Янкин Ю.Ю., Шальто А.А. Автоматное программирование ПЛИС в задачах управления электроприводом // Информационно-управляющие системы. – 2011. – №1. – С. 50–56.
3. Козаченко В.Ф. Эффективный метод программной реализации дискретных управляющих автоматов во встроенных системах управления. http://www.motorcontrol.ru/publications/state_mashine.pdf.
4. Вавилов К.В., Шальто А.А. Что плохого в неавтоматном подходе к программированию контроллеров? // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – № 01. – С. 49–51.
5. Шальто А.А. Парадигма автоматного программирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 53. Автоматное программирование. – 2008. – С. 3–24.

6. Шалыто А.А. Автоматное программирование / Труды конференции “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения”. – Институт проблем управления имени В.А.Трапезникова РАН, г. Москва, Россия, октябрь 2010 г. – С. 001213–001224.

7. Ковалев С.П. Применение формальных методов для обеспечения качества вычислительных систем // Вестник новосибирского государственного университета. Серия “Математика, механика, информатика”. Том IV. – Выпуск 2. – 2004. – С. 49–74.

8. Малюх В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 192 с.

9. Норенков В.Н. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.

10. *Perspectives in Control Engineering: Technologies, Application and New Direction / Edited by T. Samad.* IEEE Press, NY., 2001. – 502 p.

УДК 621.314.57

АВТОМАТНА МОДЕЛЬ ПОВЕДІНКИ ТИРИСТОРНОГО КЛЮЧА

О.П. Алимов, канд.техн.наук, **Ю.С. Кулешов**, канд.техн.наук, **О.О. Головко**, канд.техн.наук

Київський національний університет технологій та дизайну,

вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01011, Україна.

Синтезовано автоматну модель поведінки тиристорного ключа, всі компоненти якої подані явно, що дозволяє формалізувати логічний синтез цифрової системи керування електричного перетворювача з наступною її реалізацією або програмно з використанням МП-засобів, або апаратно з використанням ВІС програмованої логіки. Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: автоматна модель, тиристорний ключ, структурний синтез.

AUTOMATIC MODEL OF BEHAVIOUR THYRISTOR A SWITCH

O.P. Alymov, Yu.E. Kuleshov, O.O. Golovko

National university of technologies and design of Kyiv,

2, Nemirovich-Danchenko street, Kyiv, 01011, Ukraine.

The automatic model of behaviour thyristor a switch which all components are set obviously is synthesised, and allowing to formalize logic synthesis of a digital control system of the electric converter with its subsequent realisation or on the basis of microprocessor means, or programmed means of creation of digital technics (SPLD, CPLD, FPGA, SoC, SoPC). References 10, table 1, figures 5.

Keywords: the automatic model, thyristor switch, structural synthesis.

1. Gladshstein M. The use of microcontrollers and DSP-processors to control the devices of power electronics // *Elektronnye komponenty.* – 2008. – №7. http://old.elgrad.net/intresting_stat-103.html. (Rus)

2. Yankin Yu.Yu., Shalyto A.A. Automatical Programming FPGAs in control electric // *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy.* – 2011. – №1. – Pp. 50–56. (Rus)

3. Kozachenko V.F. An efficient method for software implementation of digital control machines in embedded control systems. http://www.motorcontrol.ru/publications/state_mashine.pdf. (Rus)

4. Vavilov K.V., Shalyto A.A. What is wrong with neavtomatnom approach to programming controllers? // *Promyshlennye ASU i kontrollery.* – 2007. – №01. – Pp. 49–51. (Rus)

5. Shalyto A.A. The paradigm of automata-based programming // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik SPbGU ITMO. Vypusk 53. Avtomatnoe programmirovaniye.* – 2008. – Pp. 3–24. (Rus)

6. Shalyto A.A. Automatical Programming / *Trudy konferentsii “Tekhnicheskie i programmnye sredstva sistem upravleniia, kontroliia i izmereniia”.* – Institut problem upravleniia imeni V.A.Trapeznikova RAN, Moskva, Rossiia, oktiabr 2010. – Pp. 001213–001224. (Rus)

7. Kovalev S.P. The use of formal methods for quality assurance of computer systems // *Vestnik novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriiia “Matematika, mekhanika, informatika”.* Tom IV. – 2004. – Vypusk 2. – Pp. 49–74. (Rus)

8. Maliukh V.N. Introduction to modern CAD systems: A course of lectures. – Moskva: DMK Press, 2010. – 192 p. (Rus)

9. Norenkov V.N. Fundamentals of computer aided design: a textbook for high schools. – 4-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, 2009. – 430 p. (Rus)

10. *Perspectives in Control Engineering: Technologies, Application and New Direction / Edited by T.Samad.* IEEE Press, NY., 2001, 502 p.

Надійшла 06.12.2011

Received 06.12.2011