

УДК 519.8

А. С. ЕПИФАНОВ

*Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия***МЕТОДЫ ДООПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

В статье рассматриваются частично определенные законы функционирования программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В качестве способа задания математических моделей законов функционирования ПЛИС используются дискретные детерминированные автоматы при новом представлении автоматов их геометрическими образами, предложенном и разработанным В. А. Твердохлебовым. Проведен анализ эффективности применения классических методов интерполяции Ньютона, Лагранжа, Гаусса и др. по отношению к частично заданным геометрическим образам автоматных моделей ПЛИС.

Ключевые слова: *программируемая логическая интегральная схема, математическая модель законов функционирования, дискретный детерминированный автомат, геометрический образ автомата.*

Введение

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) представляют собой сложные цифровые интегральные микросхемы, состоящие из программируемых логических блоков и программируемых соединений между этими блоками. Математические модели ПЛИС являются базовой информацией для решения задач разработки схем, анализа и технического диагностирования, оптимизации структур и законов функционирования интегральных схем. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) относятся к техническим устройствам с достаточно сложной структурой, сложными законами функционирования и большой размерностью множеств сигналов и памяти (на данный момент промышленность выпускает модели ПЛИС с более чем 1000 выводов («пинов»)). В связи с этим имеющиеся в настоящее время математические модели ПЛИС, в частности, конечные детерминированные автоматы, оказываются не достаточными не только для решения задач, но даже для явного представления ПЛИС.

В результате проведенного анализа структуры ПЛИС отмечено, что даже в случае рассмотрения ПЛИС самой малой размерности нет возможности полного, явного и компактного представления математической модели ПЛИС традиционными символическими конструкциями: таблицами, матрицами, графами, системой логических уравнений. Так самая простая из рассматриваемых в данной работе ПЛИС (FPGA Xilinx Spartan II XC2S15) имеет 16384 байт встроенной памяти и 86 разъемов («пинов»), которые могут быть запрограммированы как в качестве

входных, так и в качестве выходных. Даже в случае, когда будет задействовано в качестве входных только 40 входных разъемов, задать с использованием символических средств автомат с $2^{8 \cdot 16384} = 2^{131072}$ состояниями и мощностью входного алфавита 2^{40} с использованием классических средств задания автоматов не возможно. Кроме того, возможности средств диагностирования в каждом используемом интервале времени ограничены наблюдением только части структуры ПЛИС и наблюдением только некоторых функций, реализуемых ПЛИС. Анализ работоспособности и локализация дефектов ПЛИС могут потребоваться на интервале времени, как угодно удаленном от начала функционирования объекта. Техническое диагностирование ПЛИС не может быть осуществлено однородными средствами диагностирования. Только совмещение тестирования, измерения физических параметров, анализ процессов "решения" объектами диагностических задач, оптическая инспекция, сигнализация и т.п. должно образовывать средства диагностирования. Ввиду указанных особенностей для задания и исследования законов функционирования ПЛИС предлагается использовать аппарат геометрических образов автоматов (позволяющий эффективно преодолевать барьер размерности автоматных моделей систем), в том числе для решения задач технического диагностирования.

Метод технического диагностирования сложных систем с использованием аппарата геометрических образов включает построение математических моделей средств технического диагностирования в форме связи диагностических взаимодействий с реакциями на них объекта диагностирования; по-

строение математических моделей в форме геометрических образов для объекта диагностирования, включающее разработку геометрических образов на основе интерполяции и экстраполяции; разработку стратегии проведения диагностического эксперимента на основе анализа геометрических образов и реализацию диагностического эксперимента в соответствии с разработанной стратегией.

В данной работе изложен метод построения полностью определенных законов функционирования ПЛИС по полученной средствами контроля и диагностирования частичной информации о фактических процессах функционирования ПЛИС в виде числового графика на основе использования методов интерполяции.

1. Геометрические образы автоматных отображений

В работе [5] В. А. Твердохлебовым предложен и развит формальный аппарат замены символьных автоматных моделей в форме таблиц, графов, логических уравнений, числовыми структурами в форме геометрических фигур, числовых уравнений и последовательностей. Этот подход предназначен для поиска новых идей и методов организации технического диагностирования сложных систем. Преобразование символьной формы автоматной модели в числовую структуру (геометрический образ законов функционирования автомата) включает линейное упорядочивание автоматного отображения $\rho_s = \bigcup_{p \in X^*} \{(p, \lambda(s, p))\}$, для инициального автомата

$A_s = (S, X, Y, \delta, \lambda, s)$, где S, X и Y – соответственно множества состояний, входных и выходных сигналов, а $\delta: S \times X \rightarrow S$ – функция переходов, $\lambda: S \times X \rightarrow Y$ – функция выходов. Автоматное отображение ρ_s взаимнооднозначно преобразуется в автоматное отображение вида $\rho'_s = \bigcup_{p \in X^*} \{(p, \lambda'(s, p))\}$, где $\lambda'(s, p)$

– последний знак последовательности $\lambda(s, p)$.

Совмещение законов функционирования δ и λ и автомата $A = (\{s_p\}_{p \in X^*}, X, Y, \delta, \lambda, s_\varepsilon)$, где множество состояний автомата формально представлено множеством $\{s_p\}_{p \in X^*}$ с геометрическими фигурами может быть осуществлено на основе: выбора точек на геометрической фигуре, выбора направления обхода этих точек и построения множества Y вторых координат для выбранных точек; построения последовательности $u_{i_1}, u_{i_2}, \dots, u_{i_t}, \dots$ соответствующей обходу выбранных на геометрической фигуре точек; выбора целого положительного числа m , множества $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ и начального линейного по-

рядка $x_1 \prec x_2 \prec \dots \prec x_m$ для определения линейного порядка ω_1 на X^* ; построение функций δ и λ с использованием указанных выше правил построения функций по точкам геометрического образа. Использование описанного геометрического подхода позволяет свойства законов функционирования дискретных детерминированных динамических систем (автоматов) представлять свойствами последовательностей или геометрических кривых.

2. Построение геометрической формы автоматных моделей программируемых логических интегральных схем

В данной работе осуществляется построение математической модели в форме геометрического образа программируемой логической интегральной схемы семейства Spartan II фирмы Xilinx, включающее разработку геометрических образов на основе классических методов интерполяции Ньютона, Лагранжа и Гаусса. Рассматривается один из основных классов алгоритмов цифровой обработки сигналов, реализуемых с помощью ПЛИС – алгоритмы, основанные на применении ортогональных преобразований: быстрые преобразования Фурье (БПФ), Хартли, Уолша, Адамара, преобразование Карунена — Лозва и др. (на рис. 1 приведен пример алгоритма, основанного на ортогональном преобразовании - алгоритм 16-точечного быстрого преобразования Фурье).

В данной работе рассмотрены преобразования на 256, 512, 1024, 2048 и 4096 точек. ПЛИС программируется на реализацию указанных алгоритмов с использованием системы Xilinx ISE 9.2i. После создания программы на языке VHDL (блок схема проекта изображена на рис. 2) используются модули ModelSim и Timing Analyzer, являющиеся компонентами среды Xilinx ISE. На основе их применения моделируется поведение ПЛИС, запрограммированной на реализацию конкретного алгоритма, и осуществляется построение множества пар вида (p, q) , где $p = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$ – последовательность входных сигналов, а $q = y_{j_1} y_{j_2} \dots y_{j_k}$ – выходная последовательность реакций. Разработка геометрического образа законов функционирования автомата типа Мили $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$ для ПЛИС, реализующей алгоритм быстрого преобразования Фурье, на основе классических методов интерполяции осуществляется при следующих ограничениях. В качестве входных «пинов» (каналов) ПЛИС в данном примере реализации алгоритма БПФ используются 28 каналов, а в качестве выходных – 40. Следовательно, мощность входного алфавита автомата, являющегося математической моделью ПЛИС,

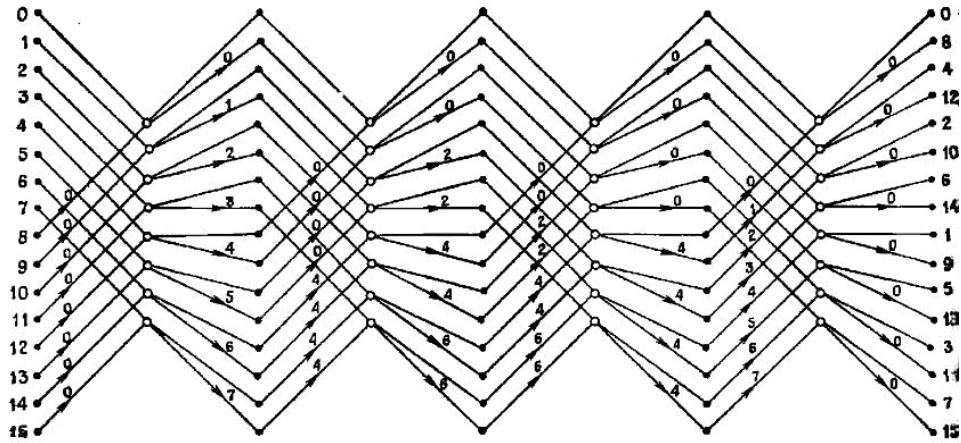


Рис. 1. Алгоритм 16-точечного БПФ по основанию 2 с постоянной структурой, без замещения, с нормальным порядком и двоично-инверсным на выходе (показаны множители для прореживания по времени и частоте)

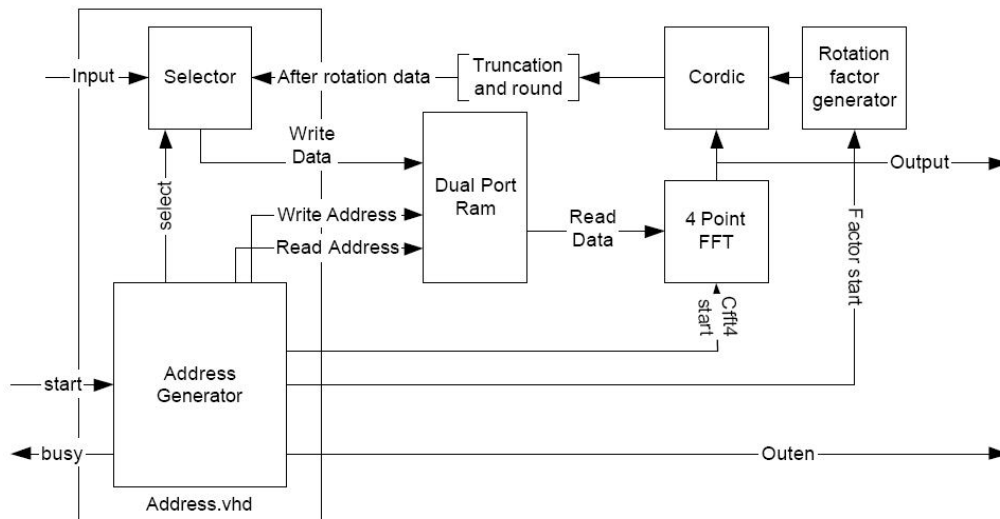


Рис. 2. Блок схема проекта, реализующего алгоритм ортогонального преобразования (БПФ)

реализующей данный алгоритм равна 228 (т.е. входной сигнал x_1 соответствует приложению на все 28 входных каналов 28 нулей, а последнему входному сигналу $x_{2^{28}}$ соответствует приложение на 28 входных каналов 28 единиц), а мощность выходного алфавита – 240. (В данном примере не учитывается, что разъемы могут находиться в т.н. Z-состоянии или высокоимпедансном состоянии. Высокоимпедансное состояние или Z-состояние — такое состояние контакта логической схемы, при котором сопротивление между этим контактом и остальной схемой очень велико.

Вывод, переведённый в Z-состояние, ведёт себя как не подключенный к схеме. Внешние устройства, подключенные к этому выводу, могут изменять напряжение на нём по своему усмотрению (в некоторых рамках), не влияя на работу схемы. И наоборот — схема не мешает внешним устройствам менять напряжение на контакте. В случае, когда учитыва-

ется высокоимпедансное состояние разъема, мощности входного и выходного алфавита автомата, являющегося математической моделью ПЛИС, реализующей данный алгоритм увеличатся до 328 и 340 соответственно). Провести анализ законов функционирования ПЛИС в явном виде даже на словах длины 10 потребует приложения $2^{28^{10}}$ последовательностей входных воздействий и наблюдения реакции на них. Объем наблюдаемой информации составит более 1072 Тб. На практике из множества последовательностей входных сигналов огромной размерности используется лишь конечное подмножество небольшой размерности, определяемое непосредственно реализуемыми ПЛИС функциями. Поведение ПЛИС при приложении входных последовательностей сигналов, не содержащихся в множестве входных последовательностей, определяемом функциональным предназначением ПЛИС, не известно и в принципе не может быть полно и

компактно представлено.

В данной работе осуществляется разработка полной математической модели ПЛИС в виде геометрического образа автомата на основе использования классических методов интерполяции.

Перед построением полного геометрического образа необходимо задать частичный геометрический образ автомата $A=(S, X, Y, \delta, \lambda, s0)$. Для этого известная информация о связи входных воздействий на ПЛИС и наблюдаемых реакций на основе используемого кодирования сигналов и замены последовательностей входных сигналов и наблюдаемых выходных сигналов их номерами по порядкам ω_1 на множестве X^* входных последовательностей и ω_2 на множестве Y выходных сигналов переводится в пары чисел $(r1(p), r2(y_{jk}))$ - где $r1(p)$ - номер входного слова $p = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$ по линейному порядку ω_1 на множестве X^* входных последовательностей, а $r2(y_{jk})$ - номер последней буквы выходного слова $q = y_{j_1} y_{j_2} \dots y_{j_k} = \lambda(s0, p)$ по линейному порядку ω_2 на множестве Y выходных сигналов (подробное описание используемых линейных порядков ω_1 на множестве X^* и ω_2 на множестве Y приведено в [5]). Полученное множество пар чисел $(r1(p), r2(y_{jk}))$ рассматривается как множество точек частично заданного геометрического образа автомата и используются в качестве узлов интерполяции. Анализируется эффективность указанных методов интерполяции для восстановления частично заданных геометрических образов законов функционирования при различном расположении и числе узлов интерполяции. Ввиду того, что в рассматриваемом примере построения полного геометрического образа автомата мощности входных и выходных алфавитов имеют огромные размерности, число точек в изображении геометрического образа даже на начальном отрезке, соответствующем входным последовательностям до длины 5 включительно, составляет $2^{28} + 2^{28^2} + 2^{28^3} + 2^{28^4} + 2^{28^5}$. Поэтому приводится полное и явное задание геометрического образа в аналитической форме – уравнении, а на рис. 3 приведен схематический пример сравнения на начальном интервале исходного геометрического образа и геометрического образа, построенного и использованием метода интерполяции Ньютона (в данном примере качестве выходного используется только один «пин» и ограничение $|X|=2$).

В результате использования модулей ModelSim и Timing Analyzer извлечена информация о связи входных воздействий на ПЛИС и наблюдаемых реакций. Построено множество, состоящее более чем из 1000 пар вида (входная последовательность, вы-

ходная последовательность). После кодирования множеств сигналов автомата и замены последовательностей входных сигналов и наблюдаемых выходных сигналов их номерами по порядкам ω_1 на множестве X^* входных последовательностей и ω_2 на множестве Y выходных сигналов данное множество преобразовано в множество из 1000 пар целых чисел $(r1(p), r2(y_{jk}))$ - где $r1(p)$ - номер входного слова $p = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k}$ по линейному порядку ω_1 на множестве X^* входных последовательностей, а $r2(y_{jk})$ - номер последней буквы выходного слова $q = y_{j_1} y_{j_2} \dots y_{j_k} = \lambda(s0, p)$ по линейному порядку ω_2 на множестве Y выходных сигналов. Данные пары интерпретируются как точки частично заданного геометрического образа и доопределении на основе используемых методов интерполяции рассматриваются как узлы интерполяции. В качестве примера для следующих 5 узлов интерполяции ниже приводятся интерполяционные многочлены Ньютона и Лагранжа.

Узлы интерполяции: (2120534, 809736530), (52632095, 30746053), (68772096, 695693412), (87339717, 730868786), (91199536, 354395489).

Интерполяционная формула Ньютона.

Интерполяционная формула Ньютона при неравноотстоящих узлах после вычисления разност-

ных отношений $\sigma^k y_i = \frac{\sigma^{k-1} y_{i+1} - \sigma^{k-1} y_i}{x_{i+k} - x_i}$,

$i=0, 1, 2, \dots, n-1, k=1, 2, \dots, n, (n+1)$ - число узлов интерполяции, x_0, x_1, \dots, x_n - узлы интерполяции, y_0, y_1, \dots, y_n - значения функции в этих узлах, имеет вид:

$$\begin{aligned} y_n(x) = & 809736530 + \sigma y_0 \cdot (x - 2120534) + \\ & + \sigma^2 y_0 \cdot (x - 2120534)(x - 52632095) + \\ & + \sigma^3 y_0 \cdot (x - 2120534)(x - 52632095) \cdot \\ & \cdot (x - 68772096) + \\ & + \sigma^4 y_0 \cdot (x - 2120534)(x - 52632095) \cdot \\ & \cdot (x - 68772096)(x - 87339717), \end{aligned}$$

где $\sigma^k y_i = \frac{\sigma^{k-1} y_{i+1} - \sigma^{k-1} y_i}{x_{i+k} - x_i}$ и процесс их вычисления

представлен в таблице 1, а значения в таблице 2. Ввиду того, что описание полинома даже для 5 узлов интерполяции довольно громоздкое, описание полиномов для большего числа узлов в явном виде не приводится. Например, запись интерполяционного многочлена при использовании 100 узлов интерполяции занимает более 10 страниц. С использованием ЭВМ вычислены интерполяционные полиномы при использовании от 10 до 1000 узлов интерполяции.



Рис. 3. Пример сравнения восстановленного с помощью метода интерполяции Ньютона и исходного геометрических образов (для 1 «пина» и |X|=2)

Таблица 1

Процесс вычисление разностных отношений $\sigma^k y_i$.

| | | σy_i | $\sigma^2 y_i$ | $\sigma^3 y_i$ | $\sigma^4 y_i$ |
|-------|-------|--|--|--|--|
| x_0 | y_0 | $\sigma y_0 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$ | $\sigma^2 y_0 = \frac{\sigma y_1 - \sigma y_0}{x_2 - x_0}$ | $\sigma^3 y_0 = \frac{\sigma^2 y_1 - \sigma^2 y_0}{x_3 - x_0}$ | $\sigma^4 y_0 = \frac{\sigma^3 y_1 - \sigma^3 y_0}{x_4 - x_0}$ |
| x_1 | y_1 | $\sigma y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ | $\sigma^2 y_1 = \frac{\sigma y_2 - \sigma y_1}{x_3 - x_1}$ | $\sigma^3 y_1 = \frac{\sigma^2 y_2 - \sigma^2 y_1}{x_4 - x_1}$ | |
| x_2 | y_2 | $\sigma y_2 = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}$ | $\sigma^2 y_2 = \frac{\sigma y_3 - \sigma y_2}{x_4 - x_2}$ | | |
| x_3 | y_3 | $\sigma y_3 = \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3}$ | | | |
| x_4 | y_4 | | | | |

Таблица 2

. Значения разностных отношений для конкретных узлов интерполяции.

| x_i | y_i | σy_i | $\sigma^2 y_i$ | $\sigma^3 y_i$ | $\sigma^4 y_i$ |
|----------|-----------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| 2120534 | 809736530 | -15,4220234 | 8,49504E-07 | -2,3257E-14 | -6,99757E-22 |
| 52632095 | 30746053 | 41,19871858 | -1,13244E-06 | -8,55906E-14 | |
| 68772096 | 695693412 | 1,894447005 | -4,43345E-06 | | |
| 87339717 | 730868786 | -97,5365158 | | | |
| 91199536 | 354395489 | | | | |

Интерполяционная формула Лагранжа для указанных пяти узлов интерполяции имеет вид (1).

Недостатком метода интерполяции Гаусса в отличие от рассмотренных методов интерполяции Ньютона и Лагранжа является ограничение возможности его использования только для случая равноотстоящих узлов интерполяции. Данное свойство накладывает дополнительные ограничения на выделение узлов интерполяции. После построения полностью заданного геометрического образа автомата на

основе классических методов интерполяции было осуществлено построение первых 2000 точек геометрического образа на основе извлечения информации о связи входных воздействий на ПЛИС (запрограммированной на реализацию алгоритма БПФ) и наблюдаемых реакций с использованием модулей ModelSim и Timing Analyzer. Полученные данные сравнивались с данными, полученными в результате интерполяции частично заданных геометрических образов.

На основе проведенного вычислительного эксперимента показано, что для рассмотренного алгоритма БПФ, реализованного на ПЛИС, метод интерполяции Гаусса дает лучшие результаты, чем методы интерполяции Ньютона и Лагранжа. Но, как уже было отмечено выше метод Гаусса имеет ограниче-

ние на расположение узлов интерполяции, которое при практическом использовании может вызвать трудности. Для каждого из рассмотренных алгоритмов из 2-х методов интерполяции (Ньютона и Лагранжа) определен наиболее эффективный метод.

$$\begin{aligned}
 y_n(x) = & 3,16833 \frac{(x-52632095)(x-68772096)(x-87339717)(x-91199536)}{10^{23}} - \\
 & -2,81741 \frac{(x-2120534)(x-68772096)(x-87339717)(x-91199536)}{10^{23}} + \\
 & +1,55299 \frac{(x-2120534)(x-52632095)(x-87339717)(x-91199536)}{10^{21}} - \\
 & -3,44789 \frac{(x-2120534)(x-52632095)(x-68772096)(x-91199536)}{10^{21}} + \\
 & +1,19164 \frac{(x-2120534)(x-52632095)(x-68772096)(x-87339717)}{10^{21}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Заключение

Используемый геометрический подход позволяет исследовать свойства законов функционирования дискретных детерминированных динамических систем на основе анализа свойств геометрических кривых и числовых последовательностей. Изложенные в данной работе результаты показывают возможность практического использования аппарата геометрических образов для задания и исследования свойств законов функционирования программируемых логических интегральных схем. Приведен метод построения полностью заданных законов функционирования ПЛИС в виде геометрического образа на основе доопределения частично заданного геометрического образа с использованием классических методов интерполяции Ньютона, Лагранжа и Гаусса.

Литература

1. *Отказобезопасные информационно-управляющие системы на программируемой логике [Текст] / под ред. В.С. Харченко, В.В. Скляра. – Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", Научно-производственное предприятие "Радий", 2008. – 320 с. – ISBN 978-966-2982-33-6.*
2. *Закревский, А. Д. Логический синтез каскадных схем [Текст] / А. Д. Закревский. – Москва : Наука, 1981. – 416 с.*
3. *Improved Logic Synthesis Algorithm for Table Look Up Architectures [Text] / R. Murgai, N. Shenoy, R. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli // Proc. of the*

Int. Conf. on Computer-Aided Design (ICCAD). – 1991. – P. 564 – 567.

4. *Sasao, T. An Application of Multiple-Valued Logic to a Design of Programmable Logic Arrays [Text] / T. Sasao // Proc. of the 8th Int. Symp. Multiple Valued Logic. – 1978.*

5. *Твердохлебов, В. А. Представление автоматных отображений геометрическими структурами [Текст] : моногр. / В. А. Твердохлебов, А. С. Епифанов. – Саратов : ООО Издательский Центр «Наука», 2013. – 204 с. – ISBN 978-5-9999-1483-5.*

6. *Епифанов, А. С. Методы интерполяции частично заданных законов функционирования автоматов [Текст] / А. С. Епифанов // Интеллектуальные системы. – 2013. – Т. 17. – Вып. 1 – 4. – С. 163 – 167. – ISSN 2075 – 9460.*

7. *Епифанов, А. С. Методы доопределения и оценки сложности законов функционирования дискретных динамических систем [Текст] / А. С. Епифанов // Проблемы управления. – 2011. – № 2. – С. 23 – 30.*

8. *Ачасова, С. М. Алгоритмы синтеза автоматов на программируемых матрицах [Текст] / С. М. Ачасова. – М., 1978. – 136 с.*

9. *Кармен, Т. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. [Текст] / Т. Кармен, Ч. Лейзерсон, К. Штайн. – М. : Изд. дом "Вильямс", 2005.*

10. *Блейхут, Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов [Текст] : пер. с англ. / Р. Блейхут. – М., 1989. – 448 с.*

11. *Малоземов, В. Н. О быстром преобразовании Фурье малых порядков [Текст] / В. Н. Малоземов, О. В. Просеков // Вестн. С.-Петербург. ун-та, 2003. – Сер. 1. – Вып. 1. – С. 36 – 45.*

Поступила в редакцію 5.02.2014, рассмотрена на редколлегии 25.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю. А. Скобцов, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина.

МЕТОДИ ДОВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОГРАМОВАНИХ ЛОГІЧНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

А. С. Єпіфанов

У статті розглядаються частково певні закони функціонування програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). В якості способу завдання математичних моделей законів функціонування ПЛІС використовуються дискретні детерміновані автомати при новій виставі автоматів їх геометричними образами, запропонованому і розробленому В. О. Твердохлібовим. Проведено аналіз ефективності застосування класичних методів інтерполяції Ньютона, Лагранжа, Гаусса та ін по відношенню частково заданих геометричним образами автоматних моделей ПЛІС.

Ключові слова: програмована логічна інтегральна схема, математична модель законів функціонування, дискретний детермінований автомат, геометричний образ автомата.

METHODS OF REGULARIZATION OF LAWS OF FUNCTIONINGS OF FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS

A. S. Epifanov

In paper are considered partially set of laws of functioning of FPGA. As way of presentation of mathematical models of laws of functioning of FPGA are used discrete determined automatons with new presentation of automatons by their geometrical images, which offered and developed by V. A. Tverdokhlebov. Are spend analysis of use of classical interpolation methods (Newton, Lagrange, Gauss etc.) to regularization of partially set geometrical images of automatons models of FPGA.

Key words: field programmable gate array, mathematical model of laws of functioning, discrete determined automaton, geometrical image of automaton, interpolation

Єпіфанов Антон Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр. Института проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия.