

Комплексный алгоритм трассировки коммутационного блока*

Д.С. Кныш, В.М. Курейчик, Технологический институт ЮФУ в г. Таганроге,
wiseman33@ya.ru, kur@tsure.ru

Аннотация — Трассировка соединений сложная технологическая задача, от качества решения которой зависит эффективность работы и технические характеристики будущей интегральной схемы и устройств на ее базе. Современные технологии изготовления СБИС идут по пути увеличения площади проводниками за счет увеличения числа слоев для разводки соединений. Трехмерные коммутационные блоки формируются в результате глобальной трассировки. Развитие технологий и уменьшение геометрических размеров дискретных элементов привело к росту ограничений и критериев трассировки. Для учета всех ограничений предлагается комплексный подход с применением гибридных генетических алгоритмов. Это позволяет повысить качество трассировки и сократить время проектирования. Проведенные экспериментальные исследования показали улучшение качества трассировки на 15 – 20 %.

Ключевые слова — трассировка коммутационного блока, генетические алгоритмы, нечеткая логика.

I. ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологий изготовления СБИС маршрут проектирования претерпел изменения. Необходима комплексная оптимизация. Комплексный подход позволяет уменьшить количество циклов в процессе проектирования. Например: после размещения и трассировки, на этапе верификации характеристики устройства не удовлетворяют ограничениям, из-за чего необходимо повторять процесс заново.

Комплексный подход привел к методологии физического синтеза. Первое поколение физического синтеза объединило средства логического синтеза и размещения. Благодаря разрушению барьера между этими этапами проектирования удалось достичь улучшения временных характеристик разрабатываемых устройств, достаточного для обеспечения работоспособности большинства проектов [12]. Действительно, для проектов с технологическими нормами от 0,25 мкм до 90 нм влияние размещения на результирующие временные характеристики наиболее значительно, а вклад

трассировки и цепей синхронизации не столь велик. Однако при уменьшении технологических норм ниже 90 нм ситуация меняется: увеличивается влияние трассировки и синхроцепей на временные характеристики устройств, усложняется процесс их производства. Поэтому на этапе физического синтеза должны учитываться и трассировка, и синтез цепей синхронизации. Необходимо учитывать и другие факторы, обеспечивающие работоспособность и стабильный выход годных кристаллов. Ниже приведен перечень основных факторов, которые влияют на изменение приоритетов в процессе проектирования при переходе к технологическим нормам ниже 90 нм. Это слои трассировки, сопротивление переходов (via resistance), электромиграция (electromigration) и др. Уже в проектах с технологическими нормами 130 нм число трассировочных слоев возрастает от 3-4 до 8-9, происходит переход к использованию меди для реализации соединений. Задержка в соединениях становится основным фактором, определяющим производительность и выход годных. Для норм 90 нм и ниже трассировка должна проводиться с учетом логической оптимизации, оптимизации размещения элементов и проектирования цепей синхронизации. Сегодня уже недостаточно оценки задержки на базе длины соединений, модели должны учитывать и более тонкие эффекты, такие как различие электрических характеристик трассировочных слоев (сопротивление может различаться в пять раз), сопротивление межслойных переходов, индуктивность и др. При трассировке должны учитываться и электромиграция, и все паразитные эффекты, влияющие на правильность функционирования устройства (зависимость электрических характеристик соединений от назначения слоев, сопротивление межслойных переходов, перекрестные помехи и шумы) [13].

Увеличение числа слоев усложняет процесс литографии, увеличивая цену разработки изделия. Уменьшить число слоев, значит увеличить плотность соединений, что в свою очередь приведет к росту

* работа выполнена при частичной финансовой поддержке по программе развития потенциала научной школы РНП 2.1.2/1652, 2.1.2/4595

рассеиваемой мощности и ухудшению технических характеристик. Постоянное уменьшение геометрических размеров дискретных элементов и сокращение ширины проводников приводит к уменьшению плотности тока и искажению передаваемых сигналов. Сокращение интервала между цепями увеличивает влияние тонких физических эффектов, таких как паразитная емкость и индуктивность, электромиграция. Уменьшение расстояния между слоями ограничено возможностями технологии производства, но чем оно меньше, тем существенней проявляется межслойная емкость. При современных технологиях производства 80% площади кристалла занимают межсоединения, и от качества их разводки зависит характеристики изделия и прибыль компании.

Количество критериев и ограничений, которые надо учитывать при решении задачи трассировки растет. Это требует новых подходов и алгоритмов для решения задачи трассировки. Для задач такого рода необходим комплекс алгоритмов. Для решения поставленных задач, авторами предлагается комплекс гибридных генетических алгоритмов (ГА). На данный момент разработан нечеткий генетический алгоритм (НГА) трассировки двухслойных коммутационных блоков. Нечеткий модуль позволяет учитывать межслойную емкость непосредственно при трассировке цепей. Это позволит соблюдать технологические ограничения на этапе трассировки.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТРАССИРОВКИ КОММУТАЦИОННОГО БЛОКА

Трассировка – это процесс соединения выводов в соответствии с налагаемыми ограничениями [1]. Трассировка интегральных схем (ИС) и сверхбольших ИС (СБИС), разделяются на глобальную (назначение цепей в определенные регионы) и детальную трассировку (прокладка соединений внутри областей). Детальная трассировка разделяется на трассировку коммутационных блоков и трассировку каналов.

Коммутационный блок представляет собой область, в классической постановке, ограниченная с четырех сторон линейками контактов (терминалов) различных цепей. Задача трассировки в блоке состоит в проведении участков трасс одноименных цепей при заданных конструкторских и технологических ограничениях. Основными ограничениями являются ширины проводников, минимально допустимый интервал между цепями и фиксированный размер коммутационного блока. Терминалы в двухслойном коммутационном блоке могут располагаться следующим образом [2]:

- Терминалы доступны в обоих слоях

- Терминалы верхней и нижней линеек контактов доступны на одном слое, а терминалы правой и левой линеек контактов доступны на втором слое.

В модели коммутационного блока выделяют два направления: сеточная и бессеточная модели.

В сеточной модели терминалы располагаются вдоль линий этой сетки, проводники проходят так же по линиям сетки. Не допускаются наложения друг на друга вертикальных и горизонтальных фрагментов, принадлежащих различным цепям, не допускается их пересечение в совместном эскизе топологии. Модель называется бессеточной, если размещение проводников происходит только относительно осей координат. В такой модели каждый элемент коммутационного блока СБИС, такие как участок проводника, терминал, межслойный переход, задается множеством пар координат (x,y).

Оба этих метода имеют свои преимущества и недостатки. Преимущество сеточной модели выражается в быстрой генерации решения коммутационного блока СБИС, наглядностью представления решения. Недостатком является сложность моделирования блока, который содержит проводники различной ширины. Этот недостаток компенсирует бессеточная технология. Но ее минусом является повышенная трудоемкость алгоритмов использующих бессеточную модель.

Трехмерный коммутационный блок представляет собой параллелепипед с несколькими слоями. На каждом слое с четырех сторон располагаются выводы цепей, причем цепи могут быть не обязательно двухтерминальные, что осложняет задачу. При сеточной модели между цепями будет сохраняться постоянный интервал, что обеспечивает контроль паразитных емкостей и индуктивности.

Расстояние между слоями определяет высоту межслойных переходов и одинаково для всех слоев. Трассировка соединений на слоях осуществляется по технологии VHV..., чередованием вертикальных и горизонтальных участков цепей. Такой подход позволит уменьшить межслойную емкость за счет меньшей перекрестной площади соединений. Межслойные переходы имеют большую ширину, чем проводник из-за технологий производства. Желательно уменьшить количество сквозных переходов (через один или более слоев), что обеспечит прочность кристалла. Существует также ограничение на максимальную длину цепи, что актуально для критических, по времени задержки, цепей.

Предложенный комплекс алгоритмов трассировки блоков включает:

- Алгоритм формирования начальной популяции, используется в генетическом алгоритме, он в свою очередь включает:
 - Построения минимального дерева Штейнера для каждой цепи, для формирования оптимальных по длине соединений
 - Размещения трасс по слоям, с учетом налагаемых ограничений и межслойной емкости блока
- Алгоритм расчета нечеткой целевой функции, используется в генетических операторах (см. раздел 3)

Рассмотрим алгоритм построения минимального дерева Штейнера. В основе лежит принцип поэтапной модификации и размещения цепей [2, 3]. Рассмотрим на примере:

1. для каждой цепи формируется список занимаемых ею терминалов $T_i = \{t_1, t_2, \dots, t_j\}$;
2. для каждой цепи формируется список промежуточных дополнительных узлов $Y_i = \{y_1, y_2, \dots, y_j\}$, которые являются точками пересечения продолжений координат x и y терминалов;
3. выбирается случайным образом цепь;
4. выбираем из множества дополнительных узлов Y_i наименее удаленный от всех терминалов узел y_j , заносим этот узел в список основных узлов $Y_{осн}$;
5. случайным образом выбирается терминал t_j из множества T_i , и соединяем его с узлом y_j прямым или L-образным участком цепи (рис. 1);
6. исключаем терминал t_j из списка не рассмотренных $T_i = T_i \setminus t_j$;

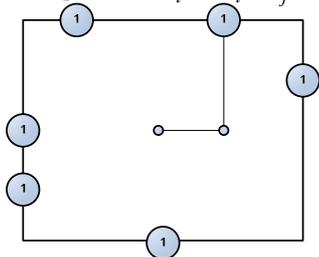


Рис. 1. L-образное соединение терминала с опорным узлом

7. случайным образом выбирается терминал t' , формируем временный список опорных узлов $Y_{вр}$ (точки пересечения продолжений координат x, y терминала с уже существующими трассами) и добавляем в него узлы из $Y_{осн}$ (рис. 2);
8. выбираем из $Y_{вр}$ ближайший узел u_k и соединяем его с терминалом прямым или

L-образным участком цепи, добавляем новые опорные узлы в $Y_{осн}$;

9. если рассмотрены все терминалы? переходим к п. 10, в противном случае к п. 7;

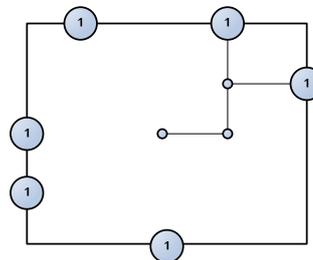


Рис. 2. Проложенный участок трассы с добавлением нового опорного узла

10. если рассмотрены все цепи, то переходим к п. 11, в противном случае к п. 3;
11. КРА (рис. 3);

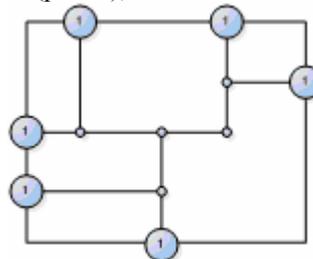


Рис. 3. Окончательно решение для цепи №1

Если цепь содержит терминалы расположенные только на противоположных сторонах, то такие терминалы соединяются методом столба Штейнера [1].

После создания трассировочной структуры каждой цепи приступаем к этапу размещения по слоям ее участков трасс. Блок схема алгоритма размещения представлена на рис. 4.

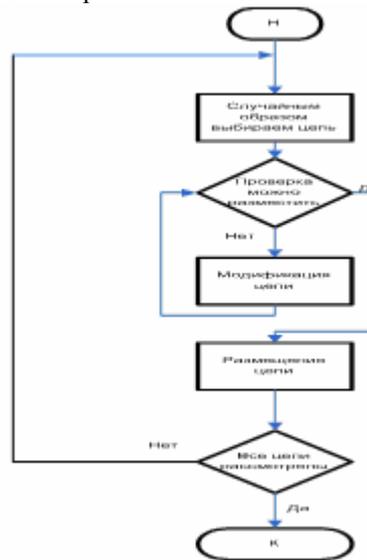


Рис. 4. Блок – схема алгоритма размещения цепей

Модификация цепи продолжается до тех пор, пока цепь нельзя будет разместить на коммутационном блоке. Модификация осуществляется следующим образом:

- определяется участок трассы, который не может быть размещен;
- определяется новая позиция для этого участка трассы;
- участок трассы перемещается на новую позицию;

После перемещения участка трассы могут возникать различные ситуации (циклы, накладывание цепей, появление «потерянных» участков) [3], которые надо учитывать. Преимущество этого метода в том, что перемещается не весь участок трассы, а только его часть (рис. 5). Алгоритм предусматривает увеличение размеров коммутационного блока, если для перемещаемого участка трассы невозможно найти новой позиции.

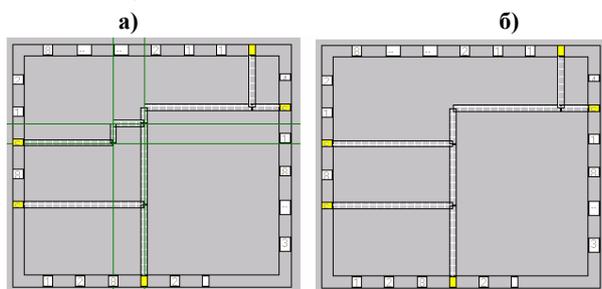


Рис. 5. Пример модификации трассы а) после модификации б) до модификации

Для оценки топологии в генетических операторах используется алгоритм расчета нечеткой целевой функции, позволяющий учитывать комплекс критериев топологии блока. Это позволяет провести предварительный анализ физических характеристик блока, и сократить время проектирования.

III. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НЕЧЕТКОЙ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

В основе работы алгоритма лежит нечеткий модуль, типовая структура которого включает [4]:

- базу знаний, которая включает информацию, данную экспертами в форме лингвистических правил управления;

- интерфейс фаззификации (fuzzification), который преобразует входные данные к нечеткому виду;

- систему вывода, которая использует их вместе с базой знаний, чтобы делать вывод по средствам заложенного метода рассуждения;

- интерфейс дефаззификации (defuzzification), который преобразует полученное нечеткое решение к четкому виду.

В разработанном алгоритме используются три нечетких критерия, определяющие решение задачи

трассировки. Удовлетворительное решение подразумевает малую длину соединений, малое число переходов и/или малую межслойную емкость.

Первоначально надо определить следующие составляющие [5]: одно или несколько правил; правила предпочтения критериев; функции принадлежности для каждого критерия. Рассмотрим эти составляющие применительно к задаче трассировки.

Нечеткие правила. В алгоритме используется правило вида: *если длина соединений малая и (число соединений мало или емкость мала), то решение хорошее.*

Правила предпочтения. В дополнение к нечетким логическим правилам, можно ввести правила предпочтения одного критерия по отношению к другим и, тем самым, акцентировать на нем внимание или, наоборот, уменьшить его влияние. Правило предпочтения, применяемое в работе: *малая длина соединений более предпочтительна, чем малое число переходов и малая емкость.*

Слово “предпочтительно” это лингвистическая переменная, которая может принимать множество лингвистических значений, таких как “сильное”, “среднее” и “слабое” предпочтения.

Функции принадлежности. В алгоритме используются три лингвистические переменные (нечеткое правило), для каждой из них необходимо определить функцию принадлежности. Эти три переменные будут полностью отражать топологию каждой цепи в отдельности.

Малая длина соединений. Для начала определим два экстремума значений критерия. Минимальное значение $length_{min}$ определим при помощи алгоритма формирования начального решения. Алгоритм ищет минимальный маршрут прокладки соединений цепи.

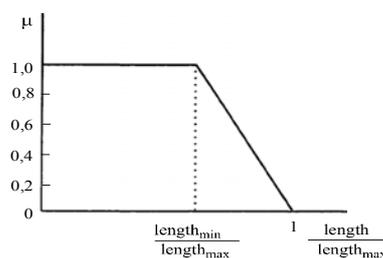


Рис. 6. График нормализованной функции принадлежности «малая длина соединений»

Максимальное значение $length_{max}$ определяется на этапе генерации начальной популяции и является максимальной длиной соединений цепи во всех особях популяции. Далее, нормализуем функцию принадлежности по значению максимальной длины $length_{max}$. Функция принадлежности

рассчитывается по следующей формуле (ее график изображен на рис. 6):

$$\mu_A(\text{length}) := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\text{length}}{\text{length}_{\max}} \leq \frac{\text{length}_{\min}}{\text{length}_{\max}} \\ \frac{\frac{\text{length}}{\text{length}_{\max}} - 1}{\frac{\text{length}_{\min}}{\text{length}_{\max}} - 1} & \text{if } \frac{\text{length}_{\min}}{\text{length}_{\max}} < \frac{\text{length}}{\text{length}_{\max}} < 1 \\ 0 & \text{if } \frac{\text{length}}{\text{length}_{\max}} \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

Для остальных критериев функция принадлежности рассчитывается по аналогии.

Модель работы нечеткого генетического алгоритма. Для расчета нечеткой целевой функции оценки топологии каждой цепи используются нечеткие критерии. Хромосома представляет собой альтернативную топологию коммутационного блока, размерность хромосомы равна количеству цепей в коммутационном блоке. Ген содержит топологию цепи, а именно фрагменты (горизонтальные и вертикальные и межслойные переходы). Каждый ген дополняется нечетким множеством вида

$$\left\{ \frac{\text{Length}}{\mu_A(\text{length})}, \frac{\text{Via}}{\mu_A(\text{via})}, \frac{C}{\mu_A(c)} \right\}, \quad (2)$$

где Length, Via, C – суммарная длина соединений, число межслойных переходов и межслойная емкость цепи соответственно. Далее необходимо преобразовать это нечеткое множество к четкому виду для конечной оценки топологии цепи на этапе дефаззификации.

Дефаззификация. Для преобразования нечеткого множества к четкому виду могут использоваться различные операции. Операции, применяемые к нечетким множествам, можно разбить на две категории: не компенсирующие, где более «слабый» элемент не может быть компенсирован за счет более «сильного» элемента, и компенсирующие, где более «слабый» элемент влияет на результат оператора [6].

Компенсирующие операторы. Целевая функция (ЦФ) с учетом нечеткого правила и компенсирующего оператора Дюбуа и Прейда рассчитывается по формуле [11]

$$\text{Cost}(x) = \frac{M_{\text{length}}(x)(M_{\text{via} \cup c}(x))}{\max\{M_{\text{length}}(x), \mu_{\text{via} \cup c}(x), \alpha\}}, \quad (3)$$

где

$$M_{\text{via} \cup c}(x) = \frac{\mu_{\text{via}}(x) + \mu_c(x) - \mu_{\text{via}}(x)\mu_c(x) - \min\{\mu_{\text{via}}(x), \mu_c(x), (1-\alpha)\}}{\max\{(1-\mu_{\text{via}}(x))(1-\mu_c(x)), \alpha\}}. \quad (4)$$

С учетом правила предпочтения расчет осуществляется по формуле

$$\text{Cos}(x) = \frac{\min\{p(\cdot)\mu_{\text{length}}(x), 1-p(\cdot)\}(\mu_{\text{via} \cup c}(x))}{\max\{\min\{p(\cdot)\mu_{\text{length}}(x), 1-p(\cdot)\}, \mu_{\text{via} \cup c}(x), \alpha\}}, \quad (5)$$

где $p(\cdot)$ – функция принадлежности лингвистической переменной “сильное предпочтение”.

Некомпенсирующие операторы. Нечеткое правило используется при вычислении некомпенсирующими операторами, согласно которому целевая функция рассчитывается по формуле

$$\text{Cost}(x) = \min\{\mu_{\text{length}}(x), \max\{\mu_{\text{via}}(x), \mu_c(x)\}\}. \quad (6)$$

Если использовать правило предпочтения с функцией принадлежности $p(\cdot)$ для лингвистической переменной «сильное предпочтение», целевая функция рассчитывается по формуле

$$\text{Cos}(x) = \min\{\min\{p(\cdot)\mu_{\text{length}}(x), 1-p(\cdot)\}, \max\{\mu_{\text{via}}(x), \mu_c(x)\}\}. \quad (7)$$

Формула 7 позволяет при расчете ЦФ выделить значимость критерия минимальной длины соединений.

Вероятностные операторы. Можно использовать следующие операторы [7, 8]: вероятностный оператор, оператор аддитивной свертки и оператор среднего арифметического.

Рассчитанная таким образом целевая функция для каждой цепи применялась в генетических операторах, схемы которых представлены в [8, 9].

Экспериментальные исследования. Для оценки решений полученных НГА, результаты его работы сравнивались с результатами простого ГА трассировки коммутационных блоков. Для исследований была разработана программа трассировки соединений в коммутационном блоке [10].

График зависимости целевой функции от числа выводов в коммутационном блоке для ГА и НГА представлен на рис. 7. Видно, что применение нечетких методов в генетических операторах приводит к улучшению результатов от 5 до 30%, для наглядности разница между значениями ЦФ при работе ГА и НГА выражена параметром дельта (рис. 8).

Для сравнения с аналогами использовались тестовые коммутационные блоки difficulty и augmented_dense. Полноценное сравнение невозможно в силу использования различных ЦФ, поэтому в табл. 1 представлены значения трех критериев решения

задачи: число переходов, суммарная длина соединения и межслойная емкость.

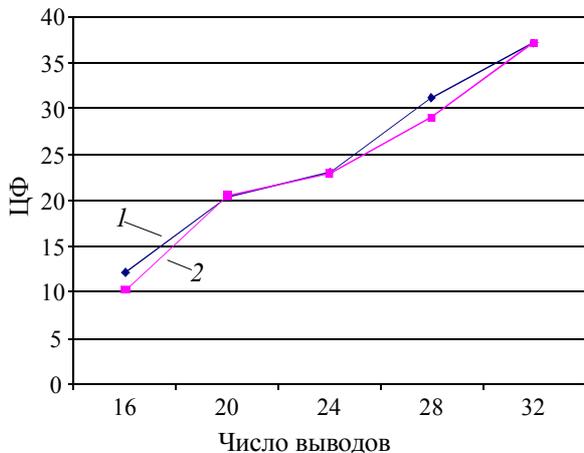


Рис. 7. Зависимость ЦФ для генетического алгоритма (кривая 1) и нечеткого генетического алгоритма (кривая 2)

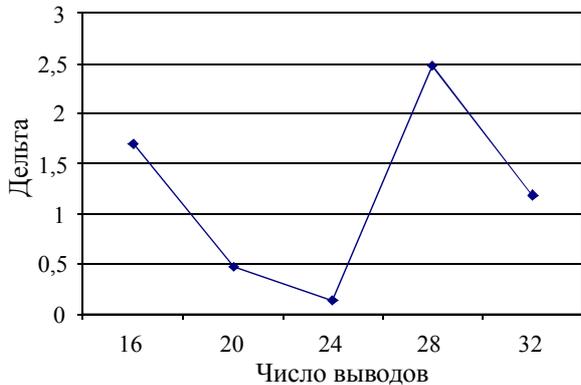


Рис. 8. Сравнение результатов работы ГА и НГА

Таблица 1

Значение критериев для тестов

Наименование теста	Число переходов	Суммарная длина соединений, мкм	Межслойная емкость, пФ
difficulty	63	277,94	1,05
augmented_den se	43	259,76	1,21

Проводился анализ работы нечетких методов, который заключался в применении различных операторов над нечеткими множествами. Эти исследования не выявили доминантных нечетких операторов, поскольку все показали приблизительно схожие результаты.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный НГА трассировки цепей с различной шириной основан на использовании нечеткой целевой функции в генетических операторах. Учитывает современные факторы

производства СБИС и показывает результаты превосходящие результаты работы ГА на 20%-30%. Главное достоинство предложенного подхода состоит в возможности применения большого количества критериев при трассировке коммутационных блоков, что очень важно в связи с развитием технологий изготовления электронных устройств и уменьшением геометрических размеров элементов. Учет ширины проводников позволяет трассировать различные цепи в коммутационном блоке, а соблюдение интервала между цепями обеспечивает заданные технологические ограничения и стабильную работу трассируемого узла. Бессеточная модель коммутационного блока позволяет обеспечить большую плотность трассировки в коммутационном блоке, и сократить его площадь. Это актуально, учитывая что, около 70% площади кристалла СБИС занимают межсоединения. Из недостатков можно выделить большое время работы алгоритма в ситуации, когда невозможно трассировать все цепи в коммутационном блоке заданного размера, и необходимо увеличивать его размер, и повторять работу алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shervani, N. Algorithms for VLSI physical design automation. // Kluwer Academy Publisher, USA, 1995.
- [2] Malgorzata Marek-Sadowska. Electrical and Computer Engineering Department // University of California, Santa Barbara, CA 93106, USA.
- [3] Gerez, S. H. Herrman, O. E. Packer: a switch box routing based on conflict elimination by local transformation // Proc. Int. Conf. Circuits and Systems. 1989. P. 961-964.
- [4] Cox E. The fuzzy systems handbook // London: Academic Press. 1994.
- [5] Adiche H. Fuzzy genetic algorithm for VLSI floorplan design // Computer engineering. 1997.
- [6] Гладков Л.А., В.В.Курейчик и др. Методы генетического поиска. // Под ред. В.М. Курейчика. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 122 с.
- [7] Yager H. Fuzzy sets and approximate reasoning in decision and control // IEEE, 1992.
- [8] Курейчик В.М., Кныш Д.С. Нечеткий оператор кроссинговера для задачи трассировки коммутационного блока // Конференция по искусственному интеллекту. 2008. Т. 3. С. 179-191.
- [9] Курейчик В.М., Кныш Д.С. Нечеткий оператор селекции для задачи трассировки коммутационного блока // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Ульяновск, 2008.
- [10] Пат. №2009610459, РФ, Программа нечеткого генетического алгоритма трассировки коммутационного блока, с цепями различной ширины, В.М. Курейчик и Д.С. Кныш. Оpubл., 2009.
- [11] Dubois D., Prade H. Fuzzy Sets and Systems Theory and Applications // Academic Press, Inc, 1980.
- [12] В. Кравченко, Д. Радченко. Новое поколение физического синтеза IC Compyler компании Synopsys // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2006. № 1. С. 76 – 79.
- [13] Kim N.S., Blaauw D., Mudge T. Quantitative Analysis and Optimization Techniques for On-Chip Cache Leakage Power. // IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems, 2005. V. 13, N 10. P.1147-1156.