

Поскольку при построении 4-разрядной схемы сумматора с последовательным переносом дополнительные затраты оборудования отсутствуют, для него необходимо 168 транзисторов и 120 линий связи. Аппаратные затраты на реализацию 4-разрядного сумматора с параллельным переносом составляют 218 транзисторов и 168 линий связи.

Учитывая, что в настоящее время схемотехнические ограничения на количество элементов практически отсутствуют и основным препятствием дальнейшего повышения степени интеграции являются межсоединения, можно заключить, что предлагаемые схемы обладают лучшими технологическими (отсутствие резисторов, значительно меньшее количество связей), энергетическими (работает в диапазоне микротоков) и эксплуатационными характеристиками. Результаты моделирования показывают, что цифровые ТТЛ-схемы, реализованные на основе математического аппарата линейной алгебры устойчиво работают при 4 ÷ 8-кратном изменении питающего напряжения. Это позволяет при построении сложных цифровых устройств на основе предлагаемого подхода обойтись без стабилизированного питания и, тем самым, улучшить весогабаритные и энергетические показатели цифровой аппаратуры.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чернов Н.И.* Линейный синтез цифровых структур АСОиУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 118 с.
2. Справочник по цифровой вычислительной технике. Под ред. Малиновского Б.Н. – Киев: Техника, 1974. – 511 с.
3. *Хорвиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники / Под ред. М.В. Гальперина. – М.: Мир, т.1, 1983. – 598 с.

**В.В. Гудиллов**

#### **МЕТОДЫ СИНТЕЗА АППАРАТНЫХ СХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

**Введение.** При рассмотрении любой многоуровневой комбинационной схемы с точки зрения математического описания, можно выделить тот факт, что представление схемы возможно в виде графа или сети, в вершинах которой находятся функциональные элементы, математическое описание которых можно представить булевыми функциями, таблицами истинности, ДНФ или такими же сетями. Поэтому, при решении задачи автоматизированного проектирования аппаратных схем с применением вероятностных генетических алгоритмов, необходимо рассматривать методы синтеза функциональных элементов или схем с позиции синтеза аппаратных схем по их функциональному описанию.

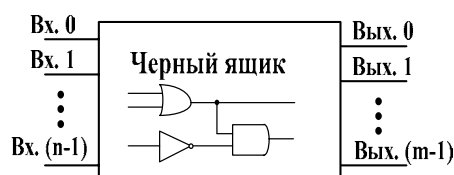
Методы динамической модификации аппаратных схем также удобно изучать на примере схем сетевой структуры, в которых не нарушается общая структура схемы, а выполняется модификация функциональных составляющих узлов решетки схемы в процессе ее работы. Посредством изменения законов функционирования этих узлов и их структуры, имеется возможность изменять алгоритм функционирования всей схемы, тем самым, адаптируя ее к изменяющимся внешним параметрам.

При изучении методов автоматизированного проектирования, необходимо рассматривать методы, позволяющие генерировать аппаратные схемы, опирающиеся только на знания, ограниченные набором функциональных элементов, из

которых возможно построение схемы, и общего закона функционирования для генерируемого блока, представленного в виде математического описания (модели). В данной работе вопрос построения схем будет представлен с позиции рассмотрения существующих методов проектирования и поиска среди них методов синтеза аппаратных схем с позиции применения вероятностных генетических алгоритмов.

**Постановка задачи проектирования.** Рассмотрение задачи проектирования как набора входных и выходных состояний сигналов, когда схема описывается в виде “черного ящика” (ЧЯ), а законы ее функционирования имеют поведенческое или функциональное описание, является наиболее сложным, т.к. такие задачи относятся к области задач структурного синтеза, не имеющих четко формализованного решения.

Задачу построения ЧЯ с точки зрения проектирования аппаратных средств, можно представить следующим образом: имея конечное множество входов схемы и конечное множество выходов, закон, описывающий зависимость состояния выходов от комбинации сигналов на входах, а также набор базовых элементов проектирования, необходимо синтезировать схему, соответствующую закону функционирования. Нетрудно видеть, что для ЧЯ с небольшим количеством входов/выходов, зная топологию синтезируемой схемы (например, когда схема имеет регулярную структуру), добиться соответствия закону функционирования можно обычным перебором элементов из выбранного базиса элементов и связей между ними. Пример схематического представления ЧЯ приведен на рис.1.



*Рис.1. Представление задачи проектирования аппаратной схемы как проектирование черного ящика*

**Методы синтеза схем.** При увеличении множества входов, решить задачу синтеза схемы с помощью алгоритмов перебора уже не представляется возможным, поэтому, на данном этапе целесообразно прибегнуть к методам, в основе которых лежат идеи применения эвристик. Данные методы должны не только синтезировать схемы, в соответствии с заданными эвристиками, но и обеспечивать возможность оценки схемы на этапе проектирования и аккумулировать хорошие решения с целью их дальнейшего изучения. При этом с целью упрощения задачи, при проектировании, необходимо использовать заведомо известный набор функциональных элементов, в базисе которых можно решить поставленную задачу проектирования, а также ввести набор ограничений и упрощений, в рамках которых будет производиться синтез. Так при проектировании схем, на этапе разработки алгоритмов автоматизированного проектирования целесообразно рассматривать решения в рамках комбинационных схем, не имеющих обратных связей, ввести какой-либо ограниченный набор состояний и уровней сигналов, исключить схемы с памятью и т.п.

При таком подходе решение задачи синтеза основано на разработке алгоритмов генерации структур из типовых элементов. Решение данной задачи возможно несколькими методиками, например, в рамках применения алгоритмов трансформации описаний различных аспектов. От успеха этого этапа зависят возможности

автоматизации синтеза и качество синтезируемых схем. После разработки общих методик, от принятых ограничений можно постепенно уходить, целенаправленно приближаясь к решению задач синтеза реальных аппаратных схем.

Существует набор методов, позволяющих синтезировать различные схемы из функциональных элементов [1-3], но все из них имеют общий недостаток – они не позволяют производить анализ схемы на этапе проектирования и не имеют возможности оценки проектных решений. Зачастую, синтезированная схема может соответствовать заданному закону функционирования по многим параметрам и лишь по некоторым не соответствовать, и, именно тут, необходимы методы, способные оценить качество схемы и то, насколько сильно данная схема соответствует требуемому решению. Установка зависимости структуры объекта и его описания есть нечто иное, как решение задачи определения параметров адекватности или идентификации параметров (расчета параметров моделей), решение которых рассматривается с позиции алгоритмов параметрического синтеза. При решении задачи идентификации параметров, функция оценки (критерия) рассматривается как оценка степени соответствия внутренних и внешних параметров схемы, получаемых с помощью сопоставления параметров испытуемой схемы с параметрами модели эталонной схемы (математической модели).

**Методы анализа синтезируемых схемных решений.** С точки зрения методик эволюционного моделирования, анализ решений должен производиться на этапе оценки решений, с помощью функции вычисления критерия, но для проектирования сложных и многопараметрических объектов (таких как аппаратные схемы), могут потребоваться дополнительные методы анализа, т.к. не всегда удается охватить все параметры синтезируемого объекта на уровне функции оценки критерия. Методы анализа синтезируемых схем могут быть различными и зависят преимущественно от методов проектирования и представления схем, используемых при синтезе, методов синтеза и постановки самой задачи.

На этапе проектирования может быть полезным разбиение анализируемой схемы на части (декомпозиция) и введение понятия отдельных частей (блоков), описывающих функциональное поведение каждого блока в отдельности. Цель данного разбиения – возможность получения общей оценки проекта по частям промежуточных решений, на основе оценки параметров или степени их соответствия для синтезируемой и эталонной схемы, т.е. сведение задачи анализа к использованию методов идентификации параметров.

Нетрудно видеть, что при наличии возможности получения качественной функциональной оценки схемы по ее составляющим, достигается возможность итерационного развития схемы, в соответствии с этой оценкой, что является необходимым условием для применения методов эволюционного моделирования. Также, на основании накопленной информации о решениях на основе частей решения (блоков схемы), возможно выделение скалярного критерия оценки, объединяющего параметры решения, с помощью которого возможно определение наилучшего решения и оценка решений на степень соответствия модели эталонной схеме. Недостатком разбиения схемы является то, что задача синтеза переходит в рамки задачи декомпозиции, имеющей набор определенных трудностей с точки зрения анализа и точности.

**Синтез схем с позиции применения вероятностных генетических алгоритмов.** Генетический алгоритм рассматривает решение (в данном случае аппаратную схему) как набор состояний хромосомы. С этой точки зрения и необходимо подходить к вопросу разработки методов синтеза, в основе которых лежат вопросы применения генетических алгоритмов.

При рассмотрении методов построения схем, имеется два аспекта, необходимых и достаточных для определения любой комбинационной схемы. Первый – обеспечение функциональности на уровне ячеек, второй – внутренняя трассировка соединений между ячейками и схемными входами/выходами.

С этой позиции на этапе проектирования схем на функциональном уровне для регулярных структур, целесообразно рассмотреть структуру хромосомы в виде описания набора функциональных логических элементов, порядкового номера элементов в нумерованной прямоугольной сетке ячеек регулярной структуры и внутренних соединений для этих ячеек. Для последовательных схем, внутренние соединения рассматриваются с позиции, когда все индивидуальные входы ячейки подключаются к выходу той ячейки, которая имеет более низкое число согласно нумерации в пределах этой схемы. Такой подход к описанию схемы устраняет любую возможность наличия обратных связей, которые могут вызвать некомбинационное поведение схемы. Но с другой стороны в данном подходе имеется ряд недостатков, связанных с ограничением области применения разрабатываемого алгоритма, т.к. многие схемы требуют наличия обратных связей. Методы представления таких схем будут рассмотрены ниже.

**Анализ и выбор генетических операторов для решения задачи автоматизированного проектирования.** Применение классических генетических алгоритмов и генетических операторов [4] для задачи проектирования аппаратуры встречает ряд затруднений. Основным является то, что генетические алгоритмы основаны на применении операторов кроссинговера и мутации как механизма эволюционирования решения, но можно показать, что для задач синтеза схем применение таких операторов является нецелесообразным. Действительно, при кодировании хромосомы, описывающей аппаратную схему регулярной структуры, оператор кроссинговера (как и мутации) будет приводить к получению потомков, которые будут описывать схемы, не имеющие никакого смысла. На уровне синтеза регулярных схем, этот вопрос можно решить посредством разработки специализированных механизмов скрещивания и мутации с учетом структуры хромосомы или введения дополнительных механизмов верификации полученных решений (потомков) на степень их адекватности схемным решениям. Но при переходе к произвольной топологии схем или к произвольному набору элементов, когда ген хромосомы имеет произвольную структуру, а хромосома переменную длину, операторы кроссинговера и мутации практически неприменимы. Поэтому для синтеза аппаратных схем целесообразно использовать методы генетического программирования [5,6] или использование вероятностных генетических алгоритмов [7,8]. Основная сложность применения методов генетического программирования в том, что они также используют оператор кроссинговера и генерируют большое количество неработоспособных схем, соответственно требуют разработки и введения методов верификации проектных решений. В вероятностных генетических алгоритмах, эволюционируемое решение (аппаратная схема) оценивается с позиции вычисления значений вероятности соответствия участков схемы сгенерированного решения и поставленной задачи. Данные алгоритмы не используют операторов кроссинговера и мутации, и способны накапливать информацию не только о решении в целом, но и о его составляющих частях, чем и являются очень привлекательными для решения задач синтеза аппаратных схем.

**Минимальный базис функциональных элементов.** Прежде чем рассматривать непосредственно методы кодирования хромосом и представление решений с позиции генетических алгоритмов, необходимо обозначить минимальный базис функциональных элементов, на уровне которых будет производиться построение

схемы. Если рассматривать постановку задачи на уровне нахождения схемы по заданной ТИ или БФ, то с условием, что функция представлена в виде СДНФ и для ее решения необходимо три логические операции: “И”, “ИЛИ”, “НЕ”, можно сделать вывод, что достаточно 3 логических элемента, реализующих данные операции, для представления схемы, соответствующей описанию поставленной задачи. При переходе к менее детализированному представлению задачи, на более высокий уровень описания, возможно применение элементов, реализующих целые фрагменты схемы (так называемые библиотечные или объектно-ориентированные элементы), при этом, их описание и базис необходимо рассматривать отдельно, исходя из специфики решаемой задачи проектирования. Нетрудно видеть, что при функциональном синтезе, базис элементов должен соответствовать минимальному функциональному набору, на котором возможно представление задачи.

**Методы кодирования решений, структура хромосомы.** При кодировании решений в виде хромосомы, генотип должен нести информацию о всей схеме, а отдельный ген, о минимальном участке схемы, например, описывать логическую ячейку схемы, ее позицию в схеме и соединение входов. Т.е. генотип задает структуру схемы, содержащую функциональную составляющую элементов (типы), их порядковую нумерацию в структуре схемы и описание входов, подаваемых на элемент. Под описанием входов тут понимается то, от каких узлов (элементов) поступают входные сигналы.

На рис.2 приведен пример кодирования хромосомы, содержащей в своей основе набор генов, каждый из которых описывает какой-либо логический элемент, представленный типом элемента, порядковым номером и набором входов.

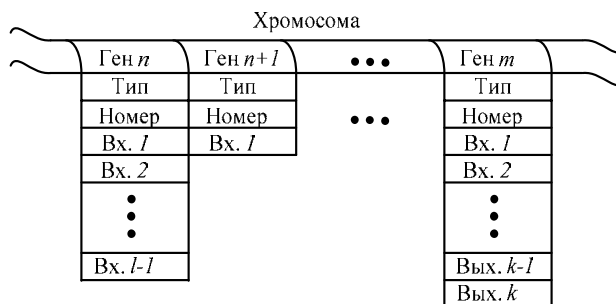


Рис.2. Пример кодирования хромосомы

Возможно расширение структуры хромосомы для кодирования элементов, имеющих несколько входов и различное количество выходов. Например, ген  $n+1$  может кодировать элемент “НЕ”. Если элемент имеет несколько выходов, то после описания входов, возможно перечисление описания его выходов (ген  $m$ ). Так же приведенная структура интересна еще и тем, что таким образом возможно представление хромосомы переменной длины, позволяющей производить поиск топологий схем произвольных структур и реализация схем различных обратных связей.

**Функция критерия отбора.** Функция критерия отбора оценивает то, насколько эволюционируемая схема, представленная в виде хромосомы, соответствует заданному набору входов/выходов, описываемых ТИ или БФ, т.е. заданному закону функционирования схемы.

В качестве основы и методик представления, для решения задач проектирования аппаратных схем, удобно рассматривать функцию оценки критерия с позиции математического аппарата нечетких множеств [9], когда функция оценки кри-

терия определяет степень принадлежности заданных параметров (описанных в задаче), некоторому множеству генерируемых параметров схемы, или наоборот. По заданному закону функционирования схемы производится построение математической модели, на соответствие которой и производится проверка принадлежности. При соблюдении условий принадлежности на всех наборах, когда значение функции критерия для всех кортежей будет равно единице, можно будет утверждать, что эволюция схемы достигла требуемого условия, т.е. решение найдено. Именно такой подход позволят производить оценку участков схемы (задача параметрического синтеза) и накапливать информацию о допустимых проектных решениях, что существенно сокращает время поиска.

**Разработка вероятностного генетического алгоритма.** Автором был разработан алгоритм автоматизированного синтеза комбинационных схем регулярной структуры, при постановке задачи в виде ДНФ. В основу алгоритма была положена специфика функционирования вероятностного генетического алгоритма UMDA, представленного в [7,8], адаптированного для решения задачи синтеза, функционирующего в области дискретных и нечетких вычислений. Алгоритм синтеза схем с позиции применения вероятностных генетических алгоритмов приведен на рис.3.

```

void СинтезСхемПоДНФ()
{
    Анализ булевой функции представленной в виде ДНФ и построение её модели;
    Формирование параметров области поиска;
    do // итерационный цикл
    {
        Инициализация параметров алгоритма (величины популяции, элитной области,
        итерационных циклов);
        Инициализация вектора вероятности;
        do
        {
            Генерация популяции;
            Вычисление функции оценки критерия;
            Оценка признака нахождения решения;
            if (решение не найдено)
            {
                Формирование элитной области;
                Вычисление вектора вероятности;
                Увеличение счетчика итерационных циклов;
            }
        }
        while (решение не найдено или итерационный процесс не завершен);
        Модификация параметров области поиска;
    }
    while (условия завершения функционирования не соблюдены);
    Формирование результата работы алгоритма;
}

```

Рис.3. Вероятностный генетический алгоритм синтеза аппаратных схем для решения задачи синтеза, представленной в виде ДНФ

Применение методов эволюционных вычислений для решения задачи синтеза в дискретной области возможно при решении задач кремниевых компиляторов, применяемых в САПР больших интегральных схем. В кремниевом компиляторе каждой функциональной ячейке ставится в соответствие определенная конструктивная ячейка. Примером может служить решение задачи автоматизированного проектирования ПЛМ большой размерности. Для решения таких задач может быть применен упомянутый выше алгоритм UMDA, практически без доработки. На рис.4 приведен пример кодирования решения для проектирования матричной структуры ПЛМ с помощью ДНФ восьми переменных.

В рамках проектирования схем в базисе логических элементов, при представлении вероятностного генетического алгоритма с позиции нечетких вычислений был реализован алгоритм эволюционного синтеза комбинационных схем. На рис.5,а приведен пример изменения значения функции вычисления критерия для построения схемы, реализующей функцию  $F = x1x2!x3x4!x5x6 \vee !x1!x2x3x5!x7 \vee x4!x6x7 \vee !x4!x6$ , а на рис.5,б –  $F = x1x2!x3x4!x5x6 \vee !x1!x2x3!x4x5!x6x7 \vee x4!x6!x7 \vee x2!x3x4x5x6x7$ , где знак “!” означает, что переменная взята в обратном виде, а знак “ $\vee$ ” соответствует операции дизъюнкции. Основными параметрами алгоритма являлись следующие значения: количество итераций – 125 циклов, величина популяции – 100, величина элитной области - 20 хромосом.

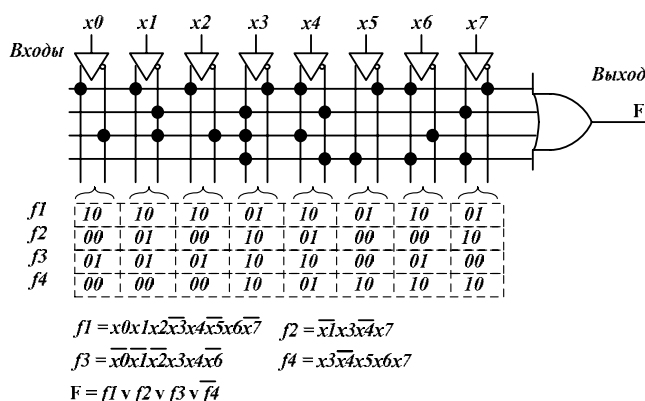


Рис.4. Пример кодирования функции восьми переменных для проектирования матричной структуры ПЛМ

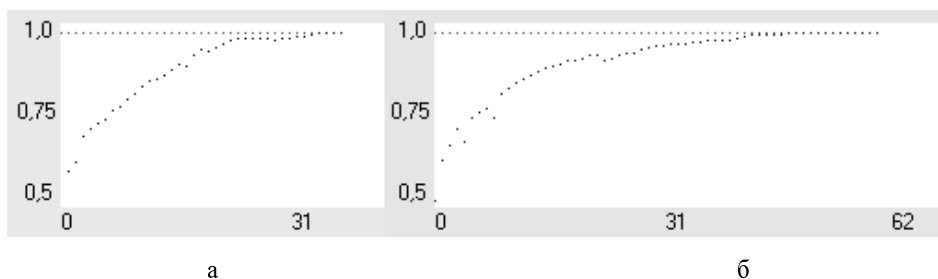


Рис.5. Примеры изменения значения функции вычисления критерия:

а)  $F = x1x2!x3x4!x5x6 \vee !x1!x2x3x5!x7 \vee x4!x6x7 \vee !x4!x6$ ;

б)  $F = x1x2!x3x4!x5x6 \vee !x1!x2x3!x4x5!x6x7 \vee x4!x6!x7 \vee x2!x3x4x5x6x7$

На 38-м итерационном цикле (слева) и на 60 (справа) была достигнута сходимость алгоритма, соответствующая единичному значению функции вычисления критерия, т.е. было найдено решение, соответствующее построению комбинационной схемы с помощью вероятностного генетического алгоритма.

**Заключение.** В данной работе рассмотрен далеко не полный перечень вопросов, решение которых необходимо при разработке методов синтеза, но уже приведенного описания методов достаточно, для определения общего базиса вопросов, которые могут стоять на этапе разработки автоматизированных методов проектирования аппаратных схем с применением вероятностных генетических алгоритмов.

Особое внимание уделено вопросам анализа методов синтеза и оценки решений, представляющих практический интерес, для разработки алгоритмов автоматизированного синтеза аппаратных схем с применением вероятностных генетических алгоритмов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику. – М.: Наука, 1979. – 272 с.
2. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – Киев: Изд-во Техника, 1975. – 768 с.
3. В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. Теоретические основы САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
4. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998.
5. Koza J. R. Genetic Programming III// San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
6. Koza J. R., Genetic Programming: On the Programming of Computers by means of Natural Selection// Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
7. H. Mühlenbein. The Equation for Response to Selection and its Use for Prediction// Evolutionary Computation, May 1998, pp. 303-346.
8. В.В. Гудиллов, Л. А. Зинченко. Аппаратная реализация вероятностных генетических алгоритмов с параллельным формированием хромосомы // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы, №4, 2003. – С. 34-38.
9. Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. Дискретная математика // Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005.

Ю.А. Кравченко

#### ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕЧЕТКОЙ КЛЕТочНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ\*

**Введение.** Для множества технических систем процесс изменения параметров комплектующих изделий является монотонным по мере накопления энергии внешних воздействующих факторов. Это позволяет обычно линеаризовать зависимость параметра или функции параметра от величины внешней нагрузки. Используя связь между нагрузкой и плотностью потока воздействующего фактора, а также, зная время воздействия, можно получить оценку параметров системы на определенное время при данном воздействующем факторе [1]. Проблемы оценки прочностных характеристик сложного объекта возникают в случае неоднородности информации при разнотипности данных, что является следствием событий разной физической природы. Кроме того, следует учитывать отсутствие необходимого количества априорной информации для осуществления прогноза с требуемой достоверностью. Непредставительность обучающей выборки обусловлена тем, что исходная для прогнозирования информация о закономерностях изменения параметров объекта не всегда достаточна [2]. Вследствие этого, вероятностные методы прогнозирования событий, использующие классический аппарат математической статистики и теории случайных функций, могут быть неэффективными.

**1. Преимущества применения нейронных сетей для прогнозирования свойств технических систем.** Целесообразность использования нейроподобных систем в целях экстраполяции технических свойств сложных динамических объек-

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 05-08-18115, РНП.2.1.2.3193.