

# Синтез логических схем с учетом энергопотребления

Черемисинова Л.Д.; Кириенко Н.А.

Лаборатория логического проектирования

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

e-mail: {cld; kir}@newman.bas-net.by

**Аннотация** — Описывается и исследуется метод построения многоуровневых логических схем из вентилях, которые служат хорошей основой для синтеза логических схем из библиотечных элементов, выполненных на основе КМОП технологии. Метод ориентирован на минимизацию площади микросхемы, реализованной на кристалле КМОП СБИС, и среднего значения рассеиваемой ею мощности.

**Ключевые слова:** логический синтез; энергопотребление

## I. ВВЕДЕНИЕ

С ростом плотности и размеров кристаллов БИС, фактор минимизации энергопотребления при проектировании интегральных схем стал играть такую же важную роль, как и их сложность. На логическом уровне сокращение энергопотребления может быть достигнуто за счет построения удачной логической структуры. В настоящей работе рассматривается задача построения и оптимизации многоуровневых представлений систем булевых функций в базисе операций И, ИЛИ, НЕ. Эта задача непосредственно следует за минимизацией булевых функций в классе ДНФ и предшествует синтезу логических схем из элементов КМОП-библиотеки. Схема из вентилях, соответствующая полученному многоуровневому представлению, представляет собой основу для преобразования на этапе технологического отображения в технологический базис путем покрытия ее фрагментов элементами технологической библиотеки.

Цель этапа построения схемы из вентилях состоит в том, чтобы построить такой вариант представления схемы, который мог бы служить хорошей отправной точкой для этапа технологического отображения в базис элементов, выполненных по технологии статических КМОП-схем. В качестве количественных оценок качества проектирования на этом этапе используется оценка по Квайну (суммарное число входных полюсов вентилях), хорошо коррелирующая с числом транзисторов, и переключательная активность схемы [1], вносящая существенный вклад в энергопотребление целевой КМОП-схемы.

## II. ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ КМОП-СХЕМЫ

### A. Особенности элементного базиса КМОП

Комбинационные элементы типичной библиотеки КМОП СБИС на логическом уровне можно представить древообразными структурами из вентилях НЕ, И и ИЛИ, реализующими инверсную логику. Например, двухъярусные И-НЕ, ИЛИ-НЕ, трехъярусные 2-И-ИЛИ-НЕ. Число ярусов различных структур варьируется обычно от 1 до 4, число входов вентилях может быть 2, 3, 4 (иногда 6, 8). Многоярусные структуры включают в себя вентиля с двумя и тремя входными полюсами.

Сложность библиотечного элемента характеризуется числом транзисторов его микросхемы. Логическая эффективность элемента характеризуется отношением числа полюсов к числу транзисторов его структуры. Например, наиболее эффективными элементами являются сильно структурированные микросхемы из вентилях с числом входов 2 и 3, наименее эффективными – инвертор и двухвходовые вентиля И и ИЛИ. Отсюда в качестве базисных при построении схем из вентилях берутся элементы И, ИЛИ с ограниченными числами  $n_{max}$  и  $m_{max}$  входов: до некоторого  $m_{max}$  (обычно  $n_{max} = m_{max} = 4$ ).

### B. Метод синтеза

Исходя из принятых критериев оптимальности сети на конечном этапе проектирования, при синтезе схемы из вентилях, целесообразно выделять общие части предварительно совместно минимизированных (с учетом полярности) функций реализуемой системы [2]. Преобразование минимизированной системы ДНФ в факторизованную форму, которой соответствует многоуровневая реализация из вентилях с ограниченным числом входов, разбивается на следующие этапы: 1) совместная нетривиальная факторизация системы ДНФ [2]: выделяются факторы (конъюнкции или ДНФ), имеющие длину не более чем  $n_{max}$  или  $m_{max}$ , и входящие в не менее чем в  $n_{dl}$  выражения ( $n_{dl} \geq 2$ ); 2) приведение каждой полученной после факторизации ДНФ к скобочному виду с учетом ограничений на максимальную длину конъюнкций  $n_{max}$  и дизъюнкций  $m_{max}$  [2].

Выполнение первого этапа позволяет выделять в явном виде общие части ДНФ булевых функций или их инверсий, выполнение второго этапа – общие части конъюнкций и дизъюнкций одной ДНФ, чтобы реализовать их однократно. Целесообразность выделения факторов с указанными ограничениями связана с тем, что двухвходовые вентиля являются наименее эффективными, в то время как более эффективны вентиля, имеющие древообразную многоуровневую структуру из двухвходовых вентилях, получаемую на третьем этапе отдельно для каждой ДНФ системы. Результатом выполнения двух этапов будет являться система факторизованных форм, представляемая в графическом виде лесом деревьев, каждое из которых может содержать вершины с полустепенями захода, превышающими предельные значения  $n_{max}$ ,  $m_{max}$ .

## III. ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

### A. Вероятностная оценка переключательной активности схем

Величина энергопотребления статических КМОП-схем на стадии логического проектирования зависит от их сложности (числа транзисторов) и переключательной активности [1]. Для оценки предпочтительности вариантов оптимизации схемы на

логическом уровне может быть использовано количественное изменение сложности и переключательной активности результирующей схемы при выборе этих вариантов. Такой подход к оценке энергопотребления дает возможность сравнивать варианты реализации схемы в процессе ее проектирования, что позволяет уже на логическом уровне проектировать схемы, потенциально имеющие низкое энергопотребление.

В основе метода оценки переключательной активности лежит подход, основанный на задании вероятностей переключения входных сигналов, отражающих частоту смены их значений и используемых для вычисления вероятностей переключения сигналов на выходных полюсах узлов схемы. Для оценки вариантов оптимизации логической схемы достаточно использовать простые оценки изменения переключательной активности при выборе вариантов оптимизации, выведенные в предположении временной и пространственной независимости сигналов на входах элементов схемы [1]. Переключательная активность полюса  $z_i$  схемы вычисляется как  $E(z_i) = 2p_i(1-p_i)$ , где  $p_i$  – вероятность появления сигнала 1, определяемая средней долей тактов, на которых сигнал на полюсе  $z_i$  имеет значение 1. Сигнальные вероятности на выходе простых элементов, типа инвертора, И, ИЛИ с  $n(e)$  входными полюсами подсчитываются по формулам:

$$p_e^{\neg} = 1 - p_1; \quad p_e^{\wedge} = \prod_{i=1}^{n(e)} p_i; \quad p_e^{\vee} = 1 - \prod_{i=1}^{n(e)} (1 - p_i).$$

Если заданы сигнальные вероятности входных сигналов схемы, то они могут быть распространены на выходы элементов схемы и через всю схему на ее выходные полюсы. Таким образом, могут быть подсчитаны переключательные активности всех полюсов схемы и соответственно переключательная активность схемы в целом.

#### В. Оценка вариантов оптимизации КМОП-схемы

Задача совместной нетривиальной факторизации множества выражений (конъюнкций или дизъюнкций) состоит в нахождении совокупности факторов, обеспечивающих: 1) выполнение упомянутых выше ограничений на длину выражений; 2) минимизацию стоимости реализации факторизуемого множества выражений; 3) минимизацию переключательной активности схемной реализации множества.

Ключевым вопросом при поиске факторов является вопрос оценки их качества. Различают две оценки качества фактора: стоимостную и энергетическую. Доминирующей считается стоимостная оценка, так как от нее в значительной степени зависит энергопотребление схемы. Стоимостную оценку качества фактора можно упрощенно определить разницей числа литералов системы выражений до и после выделения фактора, т.е. разницей числа литералов конъюнкций, покрытых минором булевой матрицы, задающей исходное множество выражений, и числа литералов, заменивших их после выделения фактора.

Аналогично энергетическое качество количественно можно оценивать тем выигрышем в переключательной активности искомой схемы, который дает выделение этого фактора. В факторизованном множестве

выражений сигнальные вероятности и переключательные активности всех выражений не изменятся по сравнению с их значениями в исходном множестве. Но изменится нагрузка полюсов схемы, соответствующих литералам, входящим в фактор, на число конъюнкций (или дизъюнкций) в факторе минус 1, соответственно во столько же раз уменьшится и вклад этих литералов в переключательную активность схемы.

Построение скобочного выражения основано на итеративном вынесении общих литералов конъюнкций заданной ДНФ  $D$  за скобки, т.е. на декомпозиции  $D = k(A) + B$ , где  $D$ ,  $A$  и  $B$  – ДНФ (дизъюнкция некоторого множества конъюнкций), а  $k$  – конъюнкция, состоящая из некоторого множества литералов, общих для всех конъюнкций из  $A$ .

Конъюнкция  $k$  выбирается следующим образом: ее ядром (начальным значением) является некоторый “лучший” литерал  $x$  конъюнкций декомпозируемой ДНФ. Вместе с этим литералом за скобки выносятся и другие общие литералы, встречающиеся во всех тех конъюнкциях, из которых вынесен литерал  $x$ . Лучшим считается тот литерал  $x$ , который входит в максимальное число  $l$  конъюнкций из  $D$ , а из равноценных по этому критерию – тот, что имеет максимальное значение переключательной активности. Такой выбор литерала обосновывается тем, что 1) энергонагрузка на полюс схемы, имеющий переключательную активность  $E_x$  и соответствующий литералу  $x$ , выносимому из  $l$  выражений, уменьшается на величину:  $(l - 1)E_x$ ; 2) наиболее активный в переключательном плане сигнал будет подаваться на схему ближе к ее выходу, это позволит уменьшить суммарную переключательную активность древообразной схемы.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методы синтеза схемы из вентиляей были программно реализованы. Проведены экспериментальные исследования на 20 схемах (как из набора тестовых примеров, так и сгенерированных случайным образом) со случайными распределениями вероятностей входных сигналов. Сравнивались реализации схем из многоходовых вентиляей, полученные с помощью программ синтеза без учета и с учетом оценки энергопотребления. Исследования показали снижение переключательной активности реализаций схем, полученных с учетом оценки энергопотребления, по сравнению с реализациями схем без учета оценки энергопотребления, в среднем на 3,48 %, уменьшение сложности на 0,59 %. Методы показывают значительно лучшие результаты (3,85 % по переключательной активности и 1,17 % по сложности) на схемах большой размерности.

[1] K. Roy. Low Power CMOS VLSI Circuit Design. N. Y. : John Wiley and Sons Inc., 2000.

[2] Н.Р. Торопов, Л.Д. Черемисинова. “Синтез комбинационных многоуровневых сетей, отображаемых в базис базовых матричных кристаллов”, Вестник Томского гос. Университета, № 9 (1), 2004, с. 249–254.