

УДК 519.876.5

Анализ алгоритмов и методов оптимизации логического синтеза, их сравнение и реализация в современных САПР микроэлектроники**Мальшев Н. М.***АО «ЭРЕМЕКС»**117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108**malyshev.n@eremex.ru*

Создана отечественная система автоматизированного проектирования микроэлектроники и логической оптимизации синтеза исходных кодов микросхем. В программном пакете реализованы алгоритмы анализа, интерпретации входных данных с последующим построением цифровых схем комбинаторной логики и их оптимизации.

Ключевые слова: САПР; HDL; ПЛИС; СнК; функциональная верификация; ГАС; синтез; статический анализ; SOP; AIG.

Рост размеров кристаллов при разработке СБИС привел к необходимости постоянного развития теории и практики автоматизированного проектирования. В современных САПР проектирования микроэлектроники большое значение уделяется алгоритмам, позволяющим сократить количество базисных элементов, используемых в проектах СБИС, без потери функциональности [1].

Одной из наиболее трудоемких стадий проектирования цифровых микросхем является этап функционально-логического проектирования, теоретической основой которого является задача минимизации булевых функций. Получение множества всех простых импликант булевой функции уже для числа независимых переменных $n > 10$ может потребовать значительной памяти и большого времени работы ЭВМ, даже с учетом применения динамического программирования — разбиения задачи на более простые подзадачи. На практике задача поиска оптимального решения минимизации булевых функций является полиномиально неразрешимой и используются различного рода эвристические алгоритмы.

Одним из эвристических подходов к задаче минимизации булевых функций является алгоритм Куайна—Мак-Класки для получения сокращенной ДНФ (дизъюнктивной нормальной формы), в котором используется склеивание каждой импликанты с каждой. Склеенные импликанты помечаются, процедура повторяется до исчерпания неповторяющихся импликант с сокращающимися на каждом ее этапе рангами. Данный метод отличается простотой аппаратной реализации, но требует большого объема памяти и характеризуется большой комбинаторной сложностью. Стоит отметить, что данные алгоритмы использовались и применялись в САПР логического синтеза в 80-е годы прошлого столетия, они успешно справлялись с оптимизацией цифровых схем с небольшим количеством независимых переменных [2].

На текущий момент в САПР широко применяются алгоритмы сокращения схем комбинаторной логики, использующие ориентированные ациклические графы (DAG), в частности AIG (and-inverted graph, конъюнктивно-инверсный граф). Вершины конъюнктивно-инверсного графа представлены конъюнкцией,



ребра могут опционально содержать инверсию. Логические элементы и нетлисты — множество соединенных логических элементов, представленные в подобном виде, позволяют производить работу по оптимизации. Сокращение ребер позволяет уменьшить площадь проектируемого кристалла без увеличения задержек, а балансировка графа позволяет минимизировать задержки без увеличения площади кристалла. Оконная функция графа, в рамках которого проводится локальная оптимизация, за счет поиска противоречий, поглощений, идентичности и пр. на различных глубинах вложенности графа [3] позволяет в конечном выделитель и значительно сократить логическую схему комбинаторной логики. Кроме того, при построении же самой логической схемы (нетлиста) из графа существует ряд методологий, позволяющих сократить площадь кристалла.

Комбинация указанных выше алгоритмов, первый (Куайна—Мак-Класки) — для минимизации булевых функций до 10 переменных, второй (AIG) — от 10 до 1000, позволяет значительно ускорить процесс логического синтеза цифровых схем.

Сравнение работы реализованных алгоритмов синтеза («кремниевой компиляции») производится с общедоступными инструментами AIGGER, ABC, а также коммерческими синтезаторами западных компаний на популярных бенчмарках.

Сравнение показало, что алгоритмы работоспособны, их использование в САПР микроэлектроники может составить конкуренцию аналогам.

Литература

1. Малышев Н. М., Рыбкин С. В. Особенность разработки САПР для проектирования и верификации конфигурации ПЛИС // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» (г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019). — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — С. 278–281.
2. Лузин С. Ю. Минимизация булевых функций на основе синтеза распределения термов по индексам // Сб. науч. трудов учебных институтов связи, 1996. — Вып. 162. — С. 27–30.
3. Possani V. N., Lu Y.-S., Mishchenko A., Pingali K., Ribas R. and Reis A. Unlocking fine-grain parallelism for AIG rewriting // Proc. ICCAD'18.