

# Сокращение временных затрат на проектирование СФ-блоков при использовании автоматизации подбора входных параметров

Е.С. Кочева<sup>1</sup>, Н.В. Желудков<sup>2</sup>, Е.В. Ткаченко<sup>3</sup>, Б.Е. Евлампиев<sup>4</sup>, К.А. Петров<sup>5</sup>

<sup>1</sup>НИЦ "Курчатовский институт" - НИИСИ, Москва, Россия,  
kocheva@cs.niisi.ras.ru;

<sup>2</sup>НИЦ "Курчатовский институт" - НИИСИ, Москва, Россия,  
nvgel@cs.niisi.ras.ru;

<sup>3</sup>НИЦ "Курчатовский институт" - НИИСИ, Москва, Россия,  
etkachenko@cs.niisi.ras.ru;

<sup>4</sup>НИЦ "Курчатовский институт" - НИИСИ, Москва, Россия,  
eboris@cs.niisi.ras.ru;

<sup>5</sup>НИЦ "Курчатовский институт" - НИИСИ, Москва, Россия,  
petrovk@cs.niisi.ras.ru.

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ времени, затрачиваемого на проектирование цифровых сложно-функциональных блоков с применением автоматизированного подбора входных параметров в САПР и без автоматизированного подбора. Для проведения анализа использовались два сложно-функциональных блока: целочисленного умножения-деления и интерфейс ввода/вывода. Анализ показал преимущество автоматизированной системы подбора входных параметров САПР с точки зрения сокращения времени, затрачивающего на поиск их оптимальных значений, на 46% и более.

Ключевые слова: топологическое проектирование, СБИС, СФ-блок, Optuna, оптимизация.

## 1. Введение

В современном мире скорость проектирования сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) является критически важным параметром разработки, ее повышение означает повышение эффективности разработки, снижение затрат предприятия и дает таким образом конкурентное преимущество организации – дизайн-центру.

Процесс проектирования цифровых СФ-блоков в системах автоматического проектирования (САПР) можно разделить на 2 глобальных этапа: настройка и отладка маршрута проектирования, непосредственный запуск данного маршрута в САПР. В процессе настройки и отладки маршрута проектирования производится настройка целого ряда входных параметров, оказывающих непосредственное влияние на итоговое качество полученной топологии будущей микросхемы либо СФ-блока, а именно на такие ключевые выходные характеристики как площадь, потребляемая мощность, быстродействие и т.д.

Для того, чтобы в результате разработки было получено устройство, отвечающее всем заданным требованиям, одной из ключевых задач является непосредственно подбор оптимального

набора значений входных параметров (НЗВП) САПР, среди которых определяется начальная плотность ячеек в СФ-блоке, период тактового сигнала, доступное количество слоев металлизации для осуществления маршрутизации в СФ-блоке и другие.

Процесс подбора НЗВП довольно ресурсоемкий как с точки зрения трудозатрат, так и затрат по времени. Это обусловлено тем, что для определения наилучшего НЗВП для данного СФ-блока разработчику требуется вручную перебрать достаточно большое количество вариантов, провести анализ выходных характеристик, соответствующих каждому НЗВП, и только после возможно сделать вывод о качестве полученной топологии.

Решением данной проблемы является использование механизма автоматизированного подбора оптимального НЗВП СФ-блока для САПР. Данный подход призван существенно сократить необходимое количество итераций запуска маршрута проектирования, а также время, затрачиваемое на осуществление запусков, за счет их распараллеливания.

Для реализации данного подхода был выбран фреймворк Optuna [1], применяемый также в

рамках моделей машинного обучения для автоматизированного поиска оптимального НЗВП в кратчайшие сроки.

В рамках данной работы проведена сравнительная оценка сокращения времени проектирования СФ-блоков, затрачиваемого на подбор оптимального НЗВП за счет применения алгоритма автоматизированного подбора НЗВП с использованием фреймворка Optuna.

## 2. Автоматизированный подбор оптимальных значений входных параметров

В работе [2] был представлен и подробно описан принцип используемого в данной работе алгоритма, на базе фреймворка Optuna (рис. 1).

С помощью управляющего скрипта осуществляется формирование уникального НЗВП, с последующей записью в файл конфигураций, передаваемый в САПР при запуске унифицированного маршрута проектирования.

В рамках каждого запуска происходит формирование набора выходных метрик, содержащих информацию о выходных характеристиках полученной топологии цифрового СФ-блока. Для оценки качества топологии анализируются следующие выходные параметры: быстродействие, площадь, потребляемая мощность и количество DRC-нарушений.

В рамках алгоритма по завершению итерации формируется числовая оценка выбранных ключевых выходных характеристик спроектированного СФ-блока с помощью Score-функции [2]:

$$S = \alpha \operatorname{sigm}(clk_n) + \beta \operatorname{sigm}(pwr_n) + \gamma \operatorname{sigm}(area_n) + \eta \operatorname{sigm}(DRC_n),$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\eta$  – коэффициенты влияния периода, потребляемой мощности, площади и числа DRC-нарушений соответственно;  $\operatorname{sigm}$  – сигмоидальная функция;  $clk_n$ ,  $pwr_n$ ,  $area_n$  и  $DRC_n$  – нормированные значения соответствующих выходных параметров.

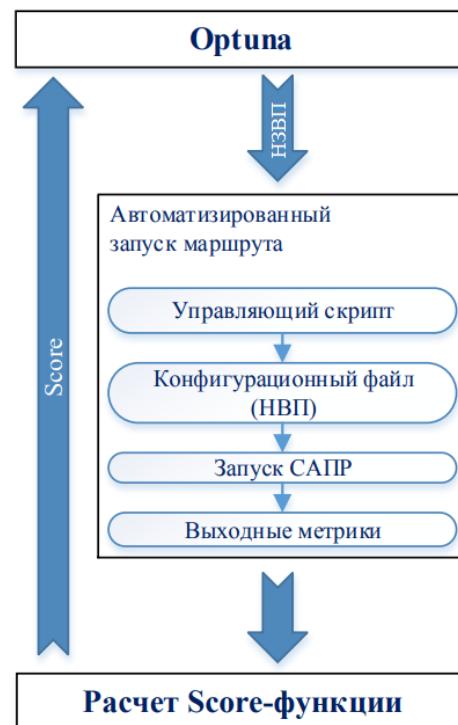


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного подбора НЗВП

Алгоритм формирует уникальный НЗВП, на его основе осуществляет запуск САПР, анализирует результат в виде значения Score-функции, и осуществляет следующий запуск, основываясь на ранее полученных данных, тем самым довольно оперативно стремится к подбору оптимального НЗВП. В работе [3] было продемонстрировано, что данный метод также способствует достижению лучших характеристик для заданного СФ-блока, чем при проектировании без его использования.

## 3. СФ-блоки для проведения сравнительного анализа

С целью проведения сравнительного анализа времени, затрачиваемого на поиск оптимальных значений НЗВП разработчиком и времени, затрачиваемым при использовании описанного выше алгоритма автоматизированного подбора НЗВП для эксперимента были выбраны два цифровых СФ-блока, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, в соответствии с техническими требованиями для КМОП 65 нм:

- `sr2k_rio` – модуль, обеспечивающий взаимодействие между центральным процессором и сопроцессором. В его состав входит порядка 1000 элементов;

- `int_mult_div` – модуль, предназначенный для операций целочисленного умножения и деления

64-разрядных чисел. В его состав входит порядка 30 000 элементов.

За счет того, что они обладают небольшими размерами и содержат только элементы стандартных (библиотечных) ячеек, обеспечивается небольшое время для полного прохождения маршрута проектирования топологии способствуя более быстрому поиску оптимального НЗВП.

Для проведения экспериментального проектирования были определены десять входных параметров, оказывающих наибольшее влияние на ключевые выходные характеристики цифрового СФ-блока СБИС, совпадающие с представленными в работе [3].

Ввиду того, что при определении функции количественной оценки качества топологии все характеристики считаются равнозначно важными, коэффициенты влияния  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\eta$ , при расчете Score-функции равны единице.

#### 4. Результаты экспериментов

Посредством алгоритма для каждого из исследуемых СФ-блоков было пройдено по 200 итераций, каждая с уникальным НЗВП. Результаты для блоков `cp2k_pio` и `int_mult_div` представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.



Рис. 2 – Результаты запуска фреймворка Optuna для СФ-блока `cp2k_pio`



Рис. 3 – Результаты запуска фреймворка Optuna для СФ-блока `int_mult_div`

Красная линия на графиках обозначает и отслеживает последнее достигнутое минимальное значение Score-функции.

Подробные результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. НЗВП и выходные характеристики при минимальном значении Score-функции для СФ-блоков `cp2k_pio` и `int_mult_div`

Имя СФ-блока	<code>int_mult_div</code>	<code>cp2k_pio</code>
Номер итерации	189	118
<b>НЗВП</b>		
Период тактового сигнала, нс	1,10	1,45
Максимальный фронт сигналов, нс	0,25	0,15
Плотность заполнения ячейками, %	0,45	0,65
Верхний металл для разводки	7	7
Ограничение на максимальную длину тактового сигнала	Да	Да
Максимальная длина дерева тактового сигнала, нс	1,5	0,5
Особые правила для цепей тактового сигнала	Нет	Нет
Экранирование цепей тактового сигнала	Нет	Да
Типы ячеек с разным пороговым напряжением	lvt, hvt	svt, hvt
Типы ячеек дерева тактового сигнала	lvt	lvt
<b>Выходные характеристики</b>		
Значение Score-функции	6,27	5,73
Частота, МГц	886,5	995
Площадь, мкм <sup>2</sup>	315 302	6 809
Потребляемая мощность, мВт	304	4,8
Количество DRC-нарушений	0	0

В рамках 200 запусков минимальное значение Score-функции для СФ-блока `int_mult_div` было достигнуто на 189 итерации. При этом

были достигнуты следующие значения ключевых выходных характеристик:

- частота составила ~887 МГц;
- потребляемая мощность ~806 мВт;
- площадь дизайна ~315302 мкм<sup>2</sup>;
- DRC-нарушения отсутствуют.

Для СФ-блока cp2k\_pio минимальное значение Score-функции не изменялось с итерации 118. При этом значения ключевых выходных характеристик:

- частота составила ~995 МГц;
- потребляемая мощность ~5 мВт;
- площадь дизайна ~6809 мкм<sup>2</sup>;
- DRC-нарушения отсутствуют.

В таблице 2 приведена сравнительная оценка затрат времени при проектировании СФ-блоков cp2k\_pio и int\_mult\_div.

Таблица 2. Сравнение затрат времени на подбор оптимального НЗВП для СФ-блоков cp2k\_pio и int\_mult\_div

Имя СФ-блока	int_mult_div	cp2k_pio
Количество возможных комбинаций НЗВП		698 544
Средняя продолжительность одной итерации	~2 ч. 20 мин.	~12 мин.
Время для перебора всех вариантов НЗВП	~1 606 651 ч.	~138 661 ч.
Количество запущенных итераций		200
Суммарное время всех итераций	~554 ч.	~50 ч.
Реальное время (с учетом распараллеливания запусков)	86 ч. 36 мин.	27 ч. 15 мин.

Согласно полученным данным, СФ-блок

int\_mult\_div показывает более явную сходимость к наименьшему значению Score-функции (рис. 3). Предположительно это может быть связано с тем, что данный СФ-блок обладает большими размерами в сравнении с СФ-блоком cp2k\_pio, а значит и изменения в НЗВП на него сказываются более значительно.

Обращаясь к таблице 1, можно увидеть, что в рамках 200 запусков с помощью автоматизированной системы подбора оптимального НЗВП удалось добиться высоких показателей выходных характеристик для каждого из СФ-блоков.

Согласно таблице 2, автоматизированный поиск оптимального набора значений входных параметров САПР с учетом параллельных запусков, позволяет сократить время на 46% для блока cp2k\_pio и на 84% для блока int\_mult\_div по сравнению с последовательными запусками. В дополнение к этому необходимо отметить, что данный метод производит поиск нужных параметров без участия разработчика, а следовательно, без привязки к его рабочему времени и количеству потенциально возможных запусков маршрута в день, что также существенно повышает эффективность разработки.

## 4. Заключение

В работе исследованы затраты времени, затрачиваемого на подбор оптимальных значений входных параметров САПР при проектировании топологии цифровых СФ-блоков как разработчиком, так и с применением автоматизированной системы подбора НЗВП на базе фреймворка Optuna, и проведен их сравнительный анализ.

Сравнительный анализ показал, что при использовании автоматизации подбора оптимальных входных параметров значительно (на 46% и более) сокращается время, затрачиваемое разработчиком на запуски маршрута проектирования СБИС в рамках подбора оптимального НЗВП.

Дальнейшие исследования требуют вопросы увеличения экономии времени разработчика, при условии роста размеров разрабатываемого СФ-блока, а также его архитектурной сложности. Отдельного рассмотрения требует автоматизация разработки СФ-блоков, в состав которых входят макроблоки (памяти, заказные СФ-блоки и пр.).

Публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ "Курчатовский институт" - НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

# Reduction of Time Consumption on VLSI IP-blocks Designing Using Input Parameter Selection Automation

**E.S. Kocheva, N.V. Zheludkov, E.V. Tkachenko, B.E. Evlampiev, K.A. Petrov**

**Abstract.** A comparative analysis of the time spent on designing digital IP cores using automated selection of input parameters in CAD and without automated selection is carried out. Two IP cores were used for the analysis: Integer Multiplication/Division and the I/O interface. The result of the analysis showed the advantage of an automated system for selecting CAD input parameters in terms of reducing the time spent on searching for their optimal values.

Keywords: layout design, VLSI, IP-block, Optuna, optimization

## Литература

1. Akiba T., Sano S., Yanase T., Ohta T., Koyama M. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework // The 25th ACM SIGKDD International Conference, 2019. P. 2623-2631.
2. Желудков Н.В., Кочева Е.С., Евлампиев Б.Е., Ткаченко Е.В. Автоматизация поиска оптимальных входных параметров при проектировании СБИС // Наноиндустрия. – 2024. – Т. 17, № S10-1(128). – С. 246-250.
3. Кочева Е.С., Желудков Н.В., Ткаченко Е.В., Чумаков К.А., Петров К.А. Сокращение энергопотребления СФ-блоков посредством автоматизированного подбора оптимальных параметров проектирования // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 80-84.