

УДК 004.436.2

ПРИМЕНЕНИЕ САПР С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ В ПОДГОТОВКЕ КАДРОВ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

КОРОТАЕВ Юрий Александрович
аспирант

Институт перспективных технологий и индустриального программирования МИРЭА –
Российский технологический университет
г. Москва, Россия

Рассматривается возможность применения систем автоматизированного проектирования с открытым исходным кодом в образовательных программах по микроэлектронике. Выполнен анализ архитектуры маршрутов логического синтеза и физического проектирования, а также функциональных возможностей, открытых САПР. Показана применимость данных инструментов для формирования базовых профессиональных компетенций и реализации практико-ориентированного обучения при подготовке специалистов в области проектирования интегральных схем.

Ключевые слова: САПР, проектирование СБИС, открытое программное обеспечение, инженерное образование, OpenLane.

Введение. Микроэлектроника является ключевой отраслью современной промышленности и основой разработки вычислительных и управляющих систем. В связи с ростом сложности интегральных микросхем и расширением области их применения возрастает потребность в специалистах, обладающих компетенциями в области проектирования СБИС.

В рамках отраслевых мероприятий, посвящённых развитию микроэлектроники, неоднократно подчёркивается значимость системной подготовки кадров для данной области. Так, на форуме «Микроэлектроника-2025» было вновь уделено особое внимание вопросам подготовки кадров и интеграции современных технологий в образовательный процесс. Министр науки и высшего образования РФ В.Н. Фальков и президент РАН Г.Я. Красников в своих выступлениях на пленарных

заседаниях подчеркнули, что достижение технологического суверенитета напрямую зависит от системной подготовки высококвалифицированных специалистов для отрасли микроэлектроники (<https://www.reflektor.kz/news/bolshinstvo-rossijskih-razrabotchikov-jelektroniki-prodolzhajut-rabotat-na-piratskih-zapadnyh-sapr>).

Среди конкретных направлений можно отметить высокую потребность в специалистах по разработке современных интегральных микросхем, таких как микроконтроллеры и микропроцессоры. Процесс создания подобных систем на кристалле (СнК) включает в себя множество этапов и требует разнообразных компетенций. На рисунке 1 представлены основные этапы разработки СБИС. В дизайн-центрах – организациях, ведущих разработку микросхем, за каждый из этапов отвечает команда узкоспециализированных инженеров, работа которых во многом связана с использованием современных САПР.



Рисунок 1. Общий маршрут проектирования СБИС

Из анализа доступных образовательных материалов [3], инициатив и публикаций [2; 4; 5] можно сделать вывод, что большинство студентов приобретают компетенции в цифровой схемотехнике с использованием языков описания аппаратуры, а также навыки работы с программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). Только единичные университеты ведут системную подготовку кадров в области верификации микросхем, разработки топологии и внедрения тестовых подсистем, а также специалистов в аналоговой схемотехнике и топологии.

Для подготовки кадров с описанными выше компетенциями необходимо наличие используемых в индустрии либо аналогичных им САПР [2]. Проприетарные зарубежные САПР всегда являлись доступными только для узкого круга университетов, а в текущих условиях международной напряженности и санкционного давления доступ к ним многократно усложняется, поэтому возрастает актуальность применения отечественных и открытых решений в образовании.

Рассматриваемые в статье подходы ориентированы на использование в образовательных программах технических вузов и могут быть применены при разработке учебных курсов и практикумов по проектированию СБИС.

Преимущества и недостатки открытых микроэлектронных САПР. Применительно

к образовательным программам в области микроэлектроники ключевым преимуществом открытых САПР является не доступ к их исходному коду, а возможность свободной и бесплатной установки как в университетской инфраструктуре, так и на персональных компьютерах обучающихся. Это обеспечивает включение в учебный процесс практических заданий, направленных на формирование актуальных профессиональных компетенций. Дополнительная возможность самостоятельной работы с САПР вне стен университета расширяет стандартный учебный процесс и способствует развитию проектной деятельности.

Повсеместное применение проприетарных САПР в вузах затруднено из-за высокой стоимости лицензий и ограничений на развёртывание. САПР с открытым исходным кодом позволяют отработать основные этапы маршрута проектирования и сформировать базовые навыки.

Общие преимущества и недостатки ПО с открытым исходным кодом многократно описаны [7]. Применительно к рассматриваемым в данной работе САПР можно выделить следующие ограничения:

- менее высокая стабильность отдельных инструментов;
- отсутствие централизованной технической поддержки;
- неполная реализация функциональности,

представленной в коммерческих решениях.

Указанные недостатки не являются фундаментальными: открытые САПР активно развиваются благодаря сообществу разработчиков, с которым может осуществляться взаимодействие на платформе GitHub.

Обзор доступных САПР и библиотек для логического синтеза и топологического проектирования СБИС. Для функциональной симуляции и верификации цифровых схем в учебных проектах применяются открытые инструменты Verilator, Icarus Verilog и GTKWave.

Yosys является ключевым инструментом логического синтеза в экосистеме открытых САПР и применяется как в маршрутах проектирования СБИС, так и при разработке проектов для ПЛИС.

Для работы с топологическим представлением интегральных схем и выполнения физической верификации достаточно давно развиваются открытые инструменты Magic и KLayout, позволяющие выполнять просмотр и редактирование файлов формата GDS, а также проводить топологическую верификацию.

Существенный прогресс в области открытых САПР для физического проектирования был достигнут в 2018-2019 гг. с запуском

проекта OpenROAD, инициированного в рамках программы DARPA. Платформа OpenROAD представляет собой интегрированную среду, объединяющую набор специализированных инструментов, реализующих ключевые этапы физического проектирования, включая размещение, трассировку, статический временной анализ и оптимизацию.

На данный момент большую популярность приобрели автоматизированные маршруты «RTL-to-GDS» таких как OpenLane/LibreLane и qFlow [1]. Они строятся на базе отдельных САПР, отвечающих за отдельные этапы маршрута (рисунок 2). К настоящему моменту проект OpenLane и его современная обновленная версия LibreLane получили наибольшее развитие и распространение среди подобных решений.

Помимо САПР для работы необходимы технологические библиотеки. В учебном процессе могут использоваться как реальные промышленные, так и учебные библиотеки. Как правило в учебных библиотеках отсутствует GDS-представления и правила физической верификации, что не позволяет познакомиться с финальными этапами маршрута проектирования.

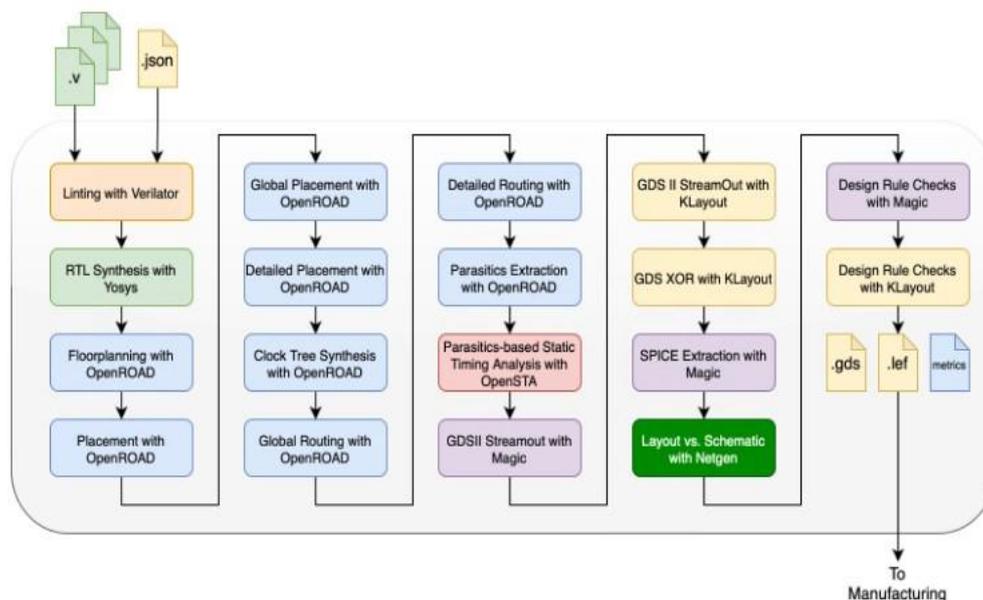


Рисунок 2. Архитектура OpenLane

В настоящее время наибольшее распространение получила открытая технология SKY130, предоставляемая компанией SkyWater сов-

местно с Google, которая широко используется в открытых маршрутах проектирования и учебных проектах.

Для запуска маршрута на вход OpenLane подается схемотехническое описание на языке описания аппаратуры и конфигурационный файл, контролирующий параметры САПР. Затем OpenLane автоматически проходит маршрут, включая анализ параметров кристалла и физическую верификацию.

Однако подобные полностью автоматизированные маршруты «RTL-to-GDS» не нашли своего места в индустриальной практике, так как в современных проектах требуется детальная настройка и контроль отдельных этапов проектирования. Поэтому, несмотря на удобство OpenLane, его использование в обучении может препятствовать тому, чтобы студенты погрузились в более сложные аспекты разработки чипов, которые критически важны для формирования всестороннего понимания проектирования СБИС.

Значительным ограничением OpenLane является то, что он абстрагирует ключевые этапы процесса физического проектирования (см. рисунок 3). К примеру, этап начального планирования кристалла (floorplan), что является критически важной частью физического проектирования, которая включает определение компоновки и размещение ключевых компонентов на чипе.

С учётом указанных особенностей целесообразно ограничивать использование OpenLane ролью вводного или демонстрационного инструмента, дополняя его работой с отдельными САПР, которые позволяют студентам работать непосредственно с каждой фазой – от планирования кристалла до размещения и трассировки, – обеспечивая им практический опыт, который более точно соответствует отраслевой практике.

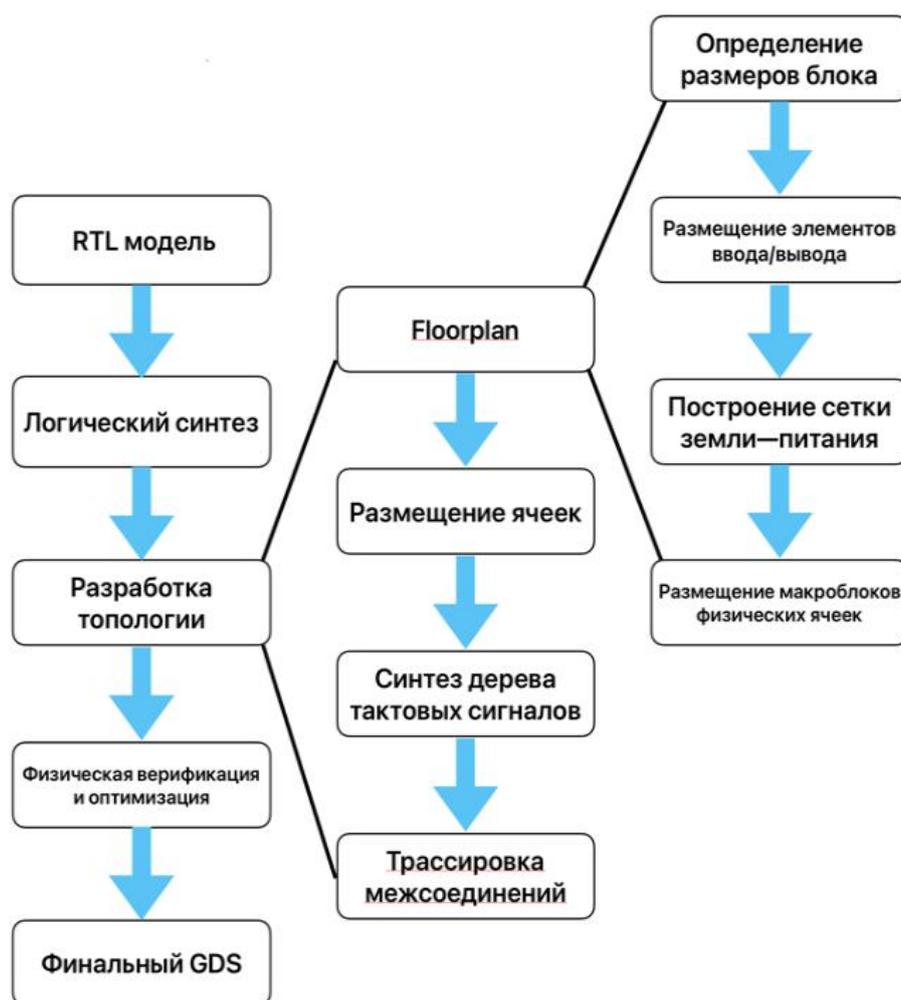


Рисунок 3. Этапы разработки топологии СБИС

Практическая реализация. Изложенные принципы легли в основу практикума «Проектирование интегральных схем» [6] разработанного на базе Центра проектирования интегральных схем РТУ «МИРЭА». Он предназначен для студентов, обучающихся по направлениям: «Нанотехнологии и микросистемная техника» (28.04.01), «Электроника и микроэлектроника» (11.03.04), а также по другим направлениям, в программу подготовки которых входит изучение основ проектирования и моделирования интегральных схем с использованием инструментов профессиональных интегрированных программных пакетов.

Такой формат позволяет обучающимся получить целостное представление о процессе проектирования интегральных схем и закрепить теоретические знания за счёт практической работы с инструментами, применяемыми на соответствующих этапах.

Практикум также доступен в полном объёме на открытом репозитории (https://github.com/korotaevyua/vlsi_be_labs).

Заключение. В работе рассмотрены воз-

можности применения систем автоматизированного проектирования с открытым исходным кодом в образовательных программах по подготовке специалистов в области проектирования сверхбольших интегральных схем. Показано, что доступность таких инструментов позволяет включать в учебный процесс практические задания, охватывающие основные этапы маршрута проектирования от логического синтеза до физической верификации.

На основе анализа открытых инструментов и автоматизированных маршрутов «RTL-to-GDS» предложены сценарии их использования в обучении, учитывающие уровень подготовки обучающихся и образовательные цели.

Практическая реализация предложенного подхода в виде практикума «Проектирование интегральных схем», используемого в образовательных программах РТУ МИРЭА, подтверждает возможность формирования у студентов базовых компетенций в области физического проектирования интегральных микросхем с применением открытых САПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камкин А.С., Смоллов С.А., Чупилко М.М. Сравнение открытых маршрутов проектирования цифровой аппаратуры: qFlow, OpenLANE, Coriolis, SymbiFlow. Труды ИСП РАН, том 33, вып. 6, 2021 г., стр. 111-130. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-8.
2. Михальченко С. Г., Дедюлина Е. П., Кротова А. С., Фомина Л. О. Разработка дисциплины «Технология отладки программ для программируемой логической интегральной схемы» // Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. Приоритетные ориентиры высшего образования в России: стратегическое партнёрство и технологический суверенитет: материалы Междунар. науч.-метод. конф. (Томск, 25-26 янв. 2024 г.). – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2024. – С. 122-125. – EDN FNQDQB.
3. Сальников И.И. проектирование цифровых устройств на ПЛИСАХ (учебное пособие по курсовому проектированию) // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 9. – С. 33-34. – EDN RCEDPX.
4. Сивков В.С. Моделирование и визуализация работы цифровых устройств на базе ПЛИС в учебном процессе // Актуальные проблемы высшего образования в области инфокоммуникационных технологий: Материалы XIII Российской научно-методической конференции, Самара, 25-28 февраля 2025 г. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2025. – С. 93-94. – EDN XYLIKВ.
5. Фахми Ш.С. ПЛИС – инструмент повышения квалификации в образовательном процессе / Ш.С. Фахми, Ю.М. Соколов, В.С. Андреев // Современное образование: содержание, технологии, качество. – 2023. – Т. 1. – С. 161-163. – EDN MUYYВH.
6. Проектирование интегральных схем [Электронный ресурс]: Практикум / Е.Ф. Певцов, М.И. Малето, Ю.А. Коротаев [и др.]. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

7. Sharp Jason (2006). The Use of Open Source Source Software in Education. Information Systems Education Journal. 4. – URL:https://www.researchgate.net/publication/228358333_The_Use_of_OpenSource_Software_in_Education (дата обращения 25.10.2025).

APPLICATION OF OPEN-SOURCE CAD SYSTEMS IN MICROELECTRONIC EDUCATION

KOROTAEV Yuri Alexandrovich

Postgraduate

Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming

MIREA – Russian Technological University

Moscow, Russia

The paper considers the use of open-source computer-aided design (CAD) systems in educational programs in microelectronics. The architecture of logic synthesis and physical design flows, as well as the functional capabilities of open-source EDA tools, are analyzed. The applicability of these tools for developing basic professional competencies and supporting practice-oriented training in integrated circuit design education is demonstrated.

Keywords: CAD, VLSI design, open-source software, engineering education, OpenLane.
