

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Ռեզյան Դավիթ Վարդանի

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ
ԲԱԶՄԱԴԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ
ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ե.13.02 «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Резамян Давид Варданович

РАЗРАБОТКА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ФИЗИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.13.02-
“Системы автоматизации”

Ереван 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ):

Գիտական ղեկավար՝

տ.գ.դ. Աշոտ Գևորգի Հարությունյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Սեյրան Շամիրի Բալասանյան
տ.գ.թ. Արթուր Ստեփանի Սահակյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Հայ-Ռուսական Համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. հուլիսի 17-ին, ժամը 12⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Կառավարման և ավտոմատացման» 032 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2025թ. հունիսի 16-ին:

032 Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.

Անուշ Վազգենի Մելիքյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА)

Научный руководитель:

д.т.н. Ашот Геворкович Арутюнян

Официальные оппоненты:

д.т.н. Сейран Шамирович Баласанян
к.т.н. Артур Степанович Саакян

Ведущая организация:

Российско-Армянский Университет

Защита диссертации состоится 17-го июля 2025г. в 12⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 032 — "Управления и автоматизации", действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 16-го июня 2025 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета 032, к.т.н.

Ануш Вазгеновна Меликян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные субмикронные технологии интегральных схем (ИС) характеризуются неуклонным ростом плотности элементов и усложнением функциональности, что приводит к значительному увеличению числа учитываемых при проектировании физических эффектов (тепловые явления, паразитные емкости и индуктивности, электромиграция, критические временные задержки и др.). Одновременно ужесточаются требования по энергопотреблению, занимаемой площади, срокам проектирования, а также по соблюдению технологических норм и правил проектирования (DRC). Традиционные методы физического проектирования ИС преимущественно нацелены на оптимизацию одного или двух параметров (как правило, минимизация длины межсоединений), причём остальные параметры рассматриваются в виде ограничений и часто игнорируются такие важные аспекты, как тепловой режим, задержки сигналов, электромагнитная совместимость и т.п. С каждым новым поколением технологий наряду с возрастанием учитываемых параметров наблюдается также усиление взаимозависимости различных параметров (например, размещение элементов с учетом тепловых воздействий может привести к увеличению длин межсоединений и наоборот).

С учетом вышесказанного и учитывая жёсткие сроки накладываемые на проектирование ИС, важной задачей становится непрерывное совершенствование методов и средств автоматизации физического проектирования ИС. Существенное усложнение задач и повышенные требования к качеству решений актуализируют задачу создания многопараметрических методов и инструментов физического проектирования ИС, позволяющих находить рациональный компромисс между различными критериями. Кроме того, с точки зрения сокращения сроков решения задачи, возникает необходимость в распределённых (параллельных) подходах, поскольку классические алгоритмы размещения и трассировки при неуклонном росте сложности уже не способны учесть все требования в разумных временных рамках.

Таким образом, разработка многопараметрических автоматизированных средств проектирования ИС, позволяющих одновременно учитывать важнейшие параметры (длина соединений, энергопотребление, тепловые эффекты и др.), является важной научно-технической задачей и имеет высокое практическое значение. Решение этой задачи даст возможность сократить затраты времени и ресурсов на проектирование, повысить качество этапов размещения, трассировки и DRC-контроля, тем самым улучшив итоговое качество разрабатываемых проектов.

Объект исследования. Объектом исследования является процесс многопараметрического физического проектирования ИС, включая комплекс алгоритмов и методов размещения элементов ИС с учётом различных физических и технологических ограничений. В частности, рассматриваются эволюционные и матричные методы оптимизации для задачи размещения, а также механизмы учёта и реализации DRC-проверок на ранних этапах проектирования.

Цель работы. Целью работы является разработка многопараметрических методов и средств автоматизированного проектирования ИС, которые позволят на этапах физического проектирования учитывать основные параметры, влияющие на

работу схемы (например, длину межсоединений, задержки в межсоединениях, тепловые эффекты, энергопотребление), и их взаимозависимости, а также обеспечить распределённое выполнение части алгоритмов для сокращения общего времени вычислений.

Методы исследования. В ходе исследования были использованы следующие методы: эволюционные алгоритмы (в частности, генетические алгоритмы - ГА) и их модификации, методы решения задачи квадратичных назначений и матричные преобразования для задачи размещения, механизмы распределённых вычислений (модель “master-worker”, параллельное выполнение эволюционных подзадач), статистические методы для оценки качества решений. Для разработки программного обеспечения применялись языки C++ и Python, а также библиотеки для создания графического интерфейса.

Научная новизна. Основная научная новизна работы определяется совокупностью следующих положений:

- Предложен комплексный многопараметрический подход к физическому проектированию ИС, основанный на эволюционных алгоритмах и позволяющий учитывать на ранних этапах размещения сразу несколько критериев (длина межсоединений, тепловые эффекты, временные задержки, правила проектирования и др.).
- Разработан механизм “специализированных популяций” для ГА размещения, каждая из которых учитывает 1...3 ключевых параметра. Это позволило эффективно распараллелить процесс размещения (за счёт распределённой реализации) и затем объединить локально оптимальные решения в рамках глобального решения общей задачи.
- Исследована возможность непосредственной интеграции DRC-правил в функцию приспособленности ГА размещения посредством введения системы штрафов. Предложенный подход упрощает задачу последующей легализации размещения и сокращает число нарушений DRC на ранних этапах проектирования.
- Показано, что использование распределённой вычислительной среды (нескольких вычислительных узлов) в разработанном многопопуляционном механизме позволяет существенно ускорить вычислительный процесс и улучшить итоговое качество размещения за счёт более глубокого и параллельного исследования пространства решений.
- Предложен эффективный метод обработки топологических данных ортогональной структуры на основе использования квадродеревьев и единой структуры данных, обеспечивающий быструю проверку геометрических правил проектирования (минимальные расстояния, непрерывность и др.). Это ускоряет обнаружение нарушений и упрощает процедуру легализации.
- Реализован механизм сжатия данных при передаче генетической информации между вычислительными узлами; разработан метод компрессии крупных генетических популяций (включая матрицы соединений) в распределённой среде. Данный метод снижает объём

сетевого трафика и обеспечивает рост производительности при миграции решений между узлами.

Практическая значимость. Разработанные алгоритмические решения и программные модули могут быть интегрированы в существующие системы автоматизированного проектирования (САПР) для повышения качества этапа размещения компонентов ИС. Предложенные методы распределённой оптимизации применимы и в других задачах, включая облачные среды и вычислительные кластеры, что обеспечивает масштабируемость процесса. Внедрение штрафного механизма упрощает процедуру легализации и снижает риск нарушений правил проектирования. Результаты рекомендуются для практического применения проектным подразделениям, специализирующимся на разработке высокоинтегрированных субмикронных ИС.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Математическая модель и формулировка задачи многопараметрического размещения элементов ИС, основанная на задаче квадратичного назначения и эволюционных методах.
- Идея специализированных популяций (подзадач) и концепция их распределённого эволюционного поиска, а также механизм последующего скрещивания результатов между ними в рамках единого решения.
- Механизм штрафов, позволяющий интегрировать правила проектирования в процесс многопараметрической оптимизации физического проектирования ИС и уменьшающий число нарушений DRC на ранних этапах размещения.
- Результаты экспериментальной проверки комплекса разработанных алгоритмов на модельных и реальных тестовых задачах, подтверждающие сокращение времени расчёта и улучшение качества решений на этапе физического проектирования.

Достоверность научных положений. Достоверность научных положений подтверждается точностью математических моделей и алгоритмов, экспериментальными проверками, проведенными на тестовых схемах, сравнении полученных результатов с существующими методами, а также экспертизой статей и докладов на научных конференциях.

Внедрение. Результаты исследования, в частности, созданные наборы геометрических данных, математические модели, методы многопараметрической оптимизации и система проверки геометрических правил внедрены в теоретические и практические занятия курсов «Вычислительная геометрия» и «Язык программирования C++» кафедры «Микроэлектронные схемы и системы» НПУА.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на:

- Международном симпозиуме "IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)" (Батуми, Грузия, 2023);
- Международном симпозиуме "IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)" (Ереван, Армения, 2024) - 2 доклада;

- Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (MIET-2023), (Одесса, Украина, 2023);
- Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (MIET-2024), (Одесса, Украина, 2024) - 2 доклада.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в восьми научных публикациях, три из которых включены в базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка литературы из 99 наименований и четырех приложений. Объем диссертации составляет 142 страницы, а вместе с приложениями – 152 страницы. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены использованные методы, научная новизна, практическая значимость работы, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе "Критический анализ методов физического проектирования интегральных схем и обоснование необходимости многопараметрического подхода" рассмотрены современные проблемы физического проектирования ИС и дана оценка эффективности существующих методов.

Проанализированы ключевые этапы проектирования ИС, где показано, что с увеличением интеграции микроэлектронных технологий значительно возрастает влияние физического проектирования на конечные характеристики ИС, а задача размещения элементов становится определяющей. Определены основные критерии оптимизации и ограничения, включающие длину межсоединений, паразитные эффекты, тепловой режим, энергопотребление и соблюдение правил проектирования (DRC).

Особое внимание уделено анализу взаимозависимости этих параметров, формирующих комплексную оптимизационную задачу:

- сокращение длины межсоединений влияет на тепловой режим и часто приводит к повышению плотности размещения;
- плотное размещение элементов приводит к увеличению паразитных эффектов и ухудшению тепловых характеристик;
- соблюдение DRC-правил ограничивает возможности минимизации площади.

Проведен критический анализ классических методов решения задачи размещения, включая аналитические методы и методы, основанные на разбиении, имитацию отжига и локальные эвристические методы. Выявлены их ограничения при решении многопараметрических задач, такие как сосредоточенность на одном параметре, сложность интеграции DRC, ограничение параллелизации и высокий риск застревания в локальных минимумах. Рассмотрены эволюционные (генетические) алгоритмы как средство глобальной оптимизации, решающие вышеперечисленные ограничения.

Проанализированы подходы к распределенным и параллельным методам размещения, включая модели "мастер-подчиненный", островную модель и распределенную козволуюцию. Выявлены проблемы синхронизации, объединения результатов и структур данных при параллельной реализации.

Обоснована необходимость многопараметрического подхода, который позволит:

- одновременно учитывать множество взаимосвязанных критериев;
- сократить сроки проектирования благодаря снижению количества итераций;
- интегрировать проверку DRC-правил на ранних этапах размещения.

Формально задача размещения представлена в виде поиска оптимального отображения набора элементов схемы на множество позиций на кристалле, минимизирующего целевую функцию:

$$f(Z_0) = \min_{Z \in U_n} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1, \\ j>i}}^n \lambda_{ij} d_{ij} z_{ij}, \quad (1)$$

где λ_{ij} - элементы матрицы связи; d_{ij} - расстояния между позициями; z_{ij} - элементы матрицы перестановок.

Для эффективного решения такой многопараметрической задачи предложено использовать распределенные эволюционные алгоритмы со специализированными субпопуляциями, каждая из которых оптимизирует подмножество параметров с последующим объединением результатов.

Таким образом, в первой главе обоснована актуальность разработки новых методов и алгоритмов, способных эффективно решать многопараметрические задачи размещения элементов ИС с учетом современных требований к проектированию.

Во второй главе "Разработка многопараметрических методов физического проектирования интегральных схем" представлены формализация и теоретическое обоснование многопараметрического подхода к задаче размещения элементов ИС.

Основная цель главы – обоснование и формализация многопараметрического подхода к задаче размещения, а также представление концептуальных методов предлагаемых решений, которые могут быть реализованы автоматизированным способом. В частности, рассматривается математическая формулировка задачи размещения элементов ИС в рамках квадратичной задачи назначения (Quadratic Assignment Problem, QAP), что позволяет сформировать единую формализованную постановку задачи: нахождение такого назначения $E \rightarrow P$, которое приведет к оптимизации целевой функции (1). Эта задача относится к NP-сложным.

Для решения задачи многопараметрического размещения в работе используются эвристические методы и многопараметрический метод объединения, позволяющие объединить все критерии в один скалярный критерий. Таким образом, многопараметрическую задачу размещения элементов можно представить как задачу физического проектирования ИС с оптимизацией по нескольким критериям.

Одной из ключевых инноваций, представленных в главе, является интеграция DRC непосредственно в процесс размещения. Традиционно при физическом

проектировании ИС проверка DRC осуществляется после того, как топология уже практически полностью сформирована. При обнаружении серьезных нарушений (например, при пересечении ячеек или несоблюдении технологических расстояний) необходимо вносить изменения в уже готовое размещение. Это приводит к итеративному процессу "переразмещение → повторная проверка → новые исправления", что значительно увеличивает время проектирования и часто ухудшает качество конечного решения.

В работе предложена упрощенная методология проверки правил проектирования, основанная на механизме квадродеревьев (quadtrees), которая позволяет обнаруживать нарушения за линейное время $O(n)$ при условии, что топология ортогональна. Экспериментальный анализ показал, что метод, основанный на квадродеревьях и алгоритме отслеживания краев, работает существенно быстрее, чем метод на основе прямоугольных деревьев (рис. 1).

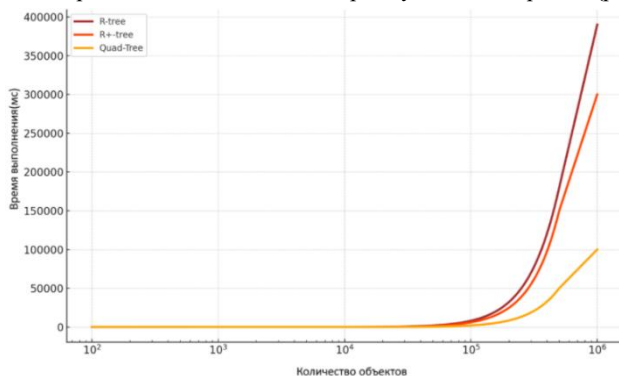


Рис. 1. Сравнение алгоритмов проверки геометрических правил

Для интеграции проверки DRC в генетический алгоритм разработана штрафная система. Целевая функция теперь представляется как сумма всех параметров плюс значения, умноженные на коэффициенты штрафов за нарушение DRC:

$$F = \sum_{i=1}^n a_i p_i + \sum_{j=1}^m b_j s_j, \quad (2)$$

где a_i и b_j коэффициенты влияния параметров и штрафов соответственно.

Механизм интеграции включает генерацию популяции, исключение 10% особей с наибольшими нарушениями, оценку фитнеса оставшихся 90% и применение генетических операторов до достижения заданного условия остановки.

Интеграция штрафной системы обеспечивает ряд преимуществ:

1. Уменьшение нарушений DRC – штрафная система эффективно учитывает нарушения DRC на ранних этапах оптимизации.
2. Повышение качества размещения – ГА фокусируется не только на функциональных параметрах (задержка, энергопотребление, площадь), но и на технологических нарушениях.

3. Снижение необходимости корректировок в последующих фазах – оптимизация со штрафами уменьшает количество и серьезность нарушений.
4. Гибкость алгоритма – применение штрафной системы позволяет гибко адаптировать ГА к конкретным проектным требованиям.

Еще одним инновационным подходом, представленным в работе, является применение специализированных субпопуляций для решения многопараметрической задачи размещения. В отличие от классической формулировки ГА, где предполагается, что одна общая популяция кодирует все параметры задачи размещения, метод специализированных субпопуляций предлагает сначала разделить критерии по группам или подзадачам, после чего осуществлять одновременно несколько эволюционных процессов.

Например, если имеются четыре параметрические группы (длина соединений, тепловые воздействия, энергопотребление, штрафы за нарушения DRC), то можно создать четыре субпопуляции, где каждая оптимизирует свою подсистему критериев. Когда каждая субпопуляция достигает локального улучшения, начинается обмен особями или миграция. Наилучшие решения из субпопуляции 1 (по их "локальному" фитнесу) могут быть переданы другим субпопуляциям и т.д.

Преимуществами такого подхода являются:

- каждая субпопуляция оптимизирует только 1...2 основных параметра, в результате чего фитнес-функция становится простой, и эволюция ускоряется;
- избегание глубоких локальных оптимумов;
- параллельная реализация;
- более быстрая сходимость к хорошим локальным решениям;
- гибкая настройка.

Согласно экспериментальным результатам, применение субпопуляций в задаче многопараметрического размещения обеспечивает улучшение значения общей целевой функции на 15...20% по сравнению с классическим ГА, сокращение времени сходимости на 50...60%, и более стабильные решения.

В результате проведенных исследований во второй главе были сделаны следующие выводы:

- 1) Предложена комплексная концепция многопараметрического физического проектирования ИС – задачи размещения, основанная на матричной реализации квадратичной задачи назначения в ГА, что при наличии высокой интеграции и больших объемов данных позволило значительно повысить эффективность решения задачи.
- 2) Предложен и разработан упрощенный механизм проверки DRC- правил на этапе размещения, основанный на штрафной системе, обеспечивающий меньшее количество итераций корректировки и высокое качество проекта.
- 3) Предложен и разработан механизм применения специализированных субпопуляций в ГА для многопараметрической задачи размещения, в котором задача разделена на несколько субпопуляций, в каждой из которых оптимизируется 1...2 критерия, а затем осуществляется глобальное объединение, учитывающее все параметры.

В третьей главе “Разработка автоматизированной подсистемы многопараметрического физического проектирования интегральных схем: архитектура и алгоритмическое обеспечение” представлена архитектура разработанной подсистемы и ее алгоритмическая реализация для решения задачи многопараметрического размещения элементов ИС. Разработанная программно-алгоритмическая подсистема предназначена для выполнения следующих функций:

- генерация альтернативных вариантов топологии с учетом нескольких критериев оптимизации (суммарная длина межсоединений, тепловые ограничения, соблюдение DRC-правил);
- автоматическая фильтрация недопустимых вариантов размещения (выявление и отсеивание решений с пересечениями элементов или нарушениями DRC-правил);
- финальная дооптимизация полученных решений в условиях ограниченного машинного времени с целью достижения компромиссного оптимального результата;
- поддержка распределенной оптимизации – возможность эффективного выполнения вычислений на многопроцессорных и распределенных системах для ускорения процесса размещения.

В соответствии с поставленными задачами разработана модульная архитектура подсистемы, включающая несколько взаимодействующих компонентов.

Разработка и алгоритмическая реализация подсистемы

генетического алгоритма

Генетический алгоритм является ядром разработанной системы. Для задачи размещения элементов ИС предложена специализированная реализация ГА, включающая следующие ключевые этапы:

1. Исходное представление схемы, как правило, представлено в форме Verilog-описания (например, тестовая схема ISCAS 85 C17, рис. 2). Для задачи размещения выполняется переход от текстового описания к матричному представлению с использованием матрицы смежности (рис. 2б), что позволяет формализовать топологические связи между элементами.

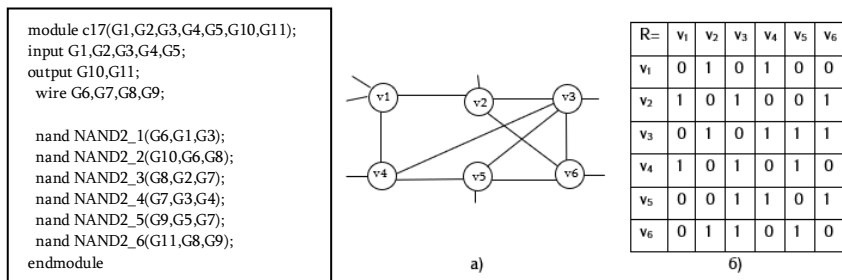


Рис. 2. Описание Verilog испытательной схемы C17 серии ISCAS 85, её граф смежности (а) и матрица (б) связей

2. Рассмотрено дискретное коммутационное поле для размещения элементов в виде множества фиксированных позиций. Для вычисления расстояний между элементами используется манхэттенское расстояние, которое соответствует практике соединения элементов в ИС ортогональными проводниками.
3. Применено кодирование натуральными числами, где гены представляют собой номера позиций, в которых размещены соответствующие элементы. Например, хромосома (3, 5, 2, 1, 6, 4) означает, что элемент 1 размещен на позиции 3, элемент 2 – на позиции 5 и т.д.
4. Настройка параметров алгоритма:
 - число итераций (T) определяется условием сходимости, когда относительное изменение значения целевой функции между последовательными итерациями не превышает заданной величины ε (0,01...0,05);
 - вероятность кроссовера (P_{cross}) и механизм селекции родителей реализованы с использованием пропорционального отбора, где вероятность выбора решения пропорциональна значению его целевой функции;
 - вероятность мутации (P_{mut}) определена как $P_{mut} = \frac{1}{K}$, где K – число генов в хромосоме;
 - размер популяции (N) вычисляется по формуле $N = \sqrt{K}$.
5. Фитнес-функция (1) для оценки качества размещения элементов ИС.

Реализация подсистемы многопараметрической оптимизации

Разработанная многопараметрическая фитнес-функция учитывает несколько ключевых критериев оптимизации:

$$F(\pi) = w_1 * F_{wire}(\pi) + w_2 * F_{thermal}(\pi) + w_3 * F_{DRC}(\pi) + w_4 * F_{power}(\pi) + w_5 * F_{parasitic}(\pi), \quad (3)$$

где F_{wire} – функция, характеризующая длину межсоединений; $F_{thermal}$ – функция, представляющая тепловое распределение; F_{DRC} – функция, характеризующая соответствие геометрическим правилам проектирования; F_{power} – функция энергопотребления; $F_{parasitic}$ – функция, характеризующая паразитные эффекты; $w_i, i = 1, 2, \dots, n$ – весовые коэффициенты.

Для обеспечения корректности функции все частные критерии приводятся к безразмерному диапазону $[0,1]$:

$$f_i^{norm} = \frac{F_i - F_i^{min}}{F_i^{max} - F_i^{min}}, \quad 0 \leq f_i^{norm} \leq 1. \quad (4)$$

Реализация подсистемы штрафной системы и проверки соответствия правилам проектирования

Для эффективной интеграции проверки соответствия правилам проектирования (DRC) в процесс оптимизации разработана специализированная

штрафная система. Вместо проверки всех хромосом на каждой итерации (что приводит к вычислительной сложности $O(n^2)$) предложен подход постфильтрации после каждого m поколения:

- для всех хромосом рассчитывается приблизительная оценка соответствия правилам проектирования;
- выполняется классификация по количеству и тяжести нарушений;
- худшие 10...20% особей помечаются как "штрафуемые" и отбрасываются.

Были проведены тесты размещения ИС со штрафной системой и без её включения. Результаты показали, что штрафная система с фильтрацией неподходящих индивидов уменьшила количество нарушений правил проектирования около 12 раз, практически полностью избавилась от перекрытий, и уменьшила число нарушений критического состояния в 14 раз. Результаты размещения показаны на рис. 3.

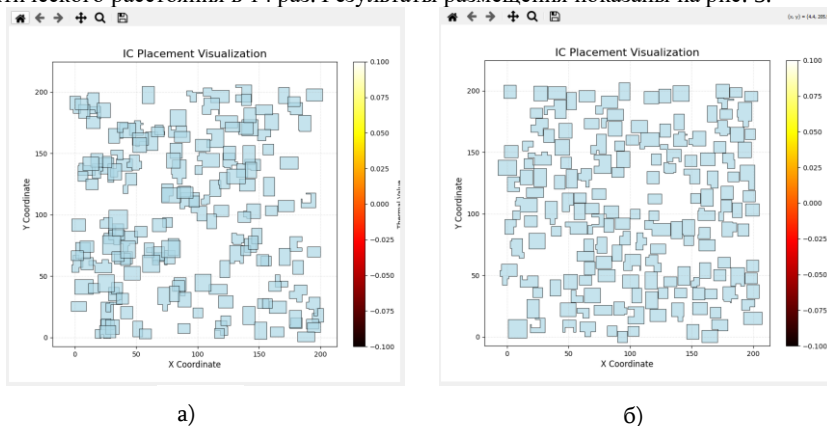


Рис. 3. Результат размещения: без штрафной системы (а), со штрафной системой (б)

Реализация подсистемы специализированных субпопуляций и распределенных вычислений

Для ускорения конвергенции многопараметрического ГА и снижения конфликтов между конкурирующими критериями в архитектуру внедрен модуль субпопуляций. Каждая субпопуляция оптимизирует только определенные компоненты фитнес-функции, игнорируя остальные:

$$F^{(s)}(\pi) = \sum_{i \in I_s} w_i * F_i(\pi), \quad (5)$$

где $I_s \in \{1, 2, \dots, 5\}$ – подмножество выбранных критериев.

Принцип работы:

1. Инициализация: создается М субпопуляций.
2. Частичная эволюция: каждая субпопуляция работает со своим вариантом фитнес-функции $F^{(s)}(\pi)$.

3. Отбор: из каждой субпопуляции выбирается подмножество лучших хромосом.
4. Объединение: хромосомы объединяются в новую основную популяцию.
5. Финальная оптимизация: к новой популяции применяется полная фитнес-функция $F(\pi)$.

По экспериментальным результатам этап субпопуляций:

- повышает качество начальной популяции по всем критериям на 12...18%;
- ускоряет финальную конвергенцию в 1.9...2.3 раза благодаря использованию распределенной вычислительной системы;
- снижает вероятность потери генетического разнообразия на начальных этапах более чем в 4 раза.

Блок-схема и алгоритмическая реализация разработанной системы

Алгоритмическая реализация разработанной системы включает в себя подсистему специализированных субпопуляций, которая инициализируется в начале процесса, и распределённо каждая субпопуляция развивается в отдельном узле, после готовности лучшие индивиды из всех субпопуляций собираются в глобальной популяции, и начинается глобальная оптимизация с системой штрафов, которая включается раз в несколько итераций, и отбрасывает из популяции индивиды с наихудшим уровнем соответствия правилам проектирования. Блок-схема данного алгоритма приведена в рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема разработанной системы

В четвертой главе “Программная реализация системы автоматизации многопараметрического физического проектирования интегральных схем” описано программное внедрение разработанных методов и приведены результаты экспериментального исследования созданной системы. Представлено программное средство MPGА (Multi-Parameter Genetic Algorithm tool) – специализированное приложение с графическим пользовательским интерфейсом, реализующее предложенные алгоритмы многопараметрического размещения. Описаны структура и функциональность данного программного обеспечения.

Разработанный инструмент MPGА предоставляет пользователю интуитивные средства для настройки и запуска процесса физического проектирования ИС с учётом нескольких параметров (рис. 5).

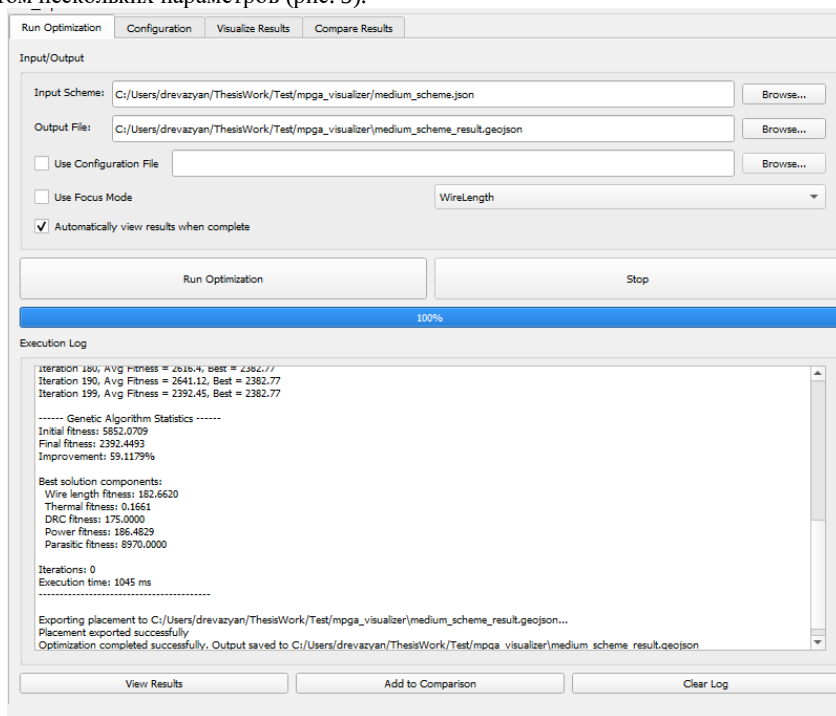


Рис. 5. Главное окно приложения MPGА

В состав программного средства входят: удобная система меню для управления проектом, окно задания исходных данных и параметров оптимизации, панель управления процессом размещения (старт, пауза, останов, выбор режимов алгоритма) и окно визуализации результатов. В интерфейсе отображаются исходная схема (расположение элементов ИС до оптимизации) и полученное оптимизированное размещение, а также дополнительная информация: распределение теплового поля по кристаллу, наложение межсоединений,

показатели длины соединений, плотности и обнаруженные нарушения DRC (рис. 6). Пользователь имеет возможность сравнивать различные варианты размещения – например, результаты работы алгоритма при разных настройках или на разных этапах, что облегчает анализ эффективности тех или иных параметров. Таким образом, программная реализация обеспечивает полноценный интерактивный цикл: от задания исходного проекта и критериев оптимизации до визуального контроля полученной топологии и всех ключевых характеристик качества проекта.

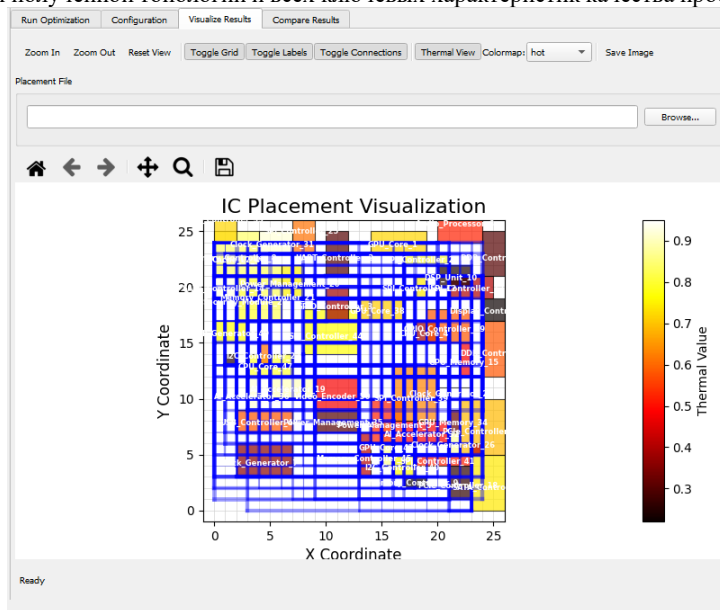


Рис. 6. Окно визуализации размещения

Далее в главе приведены результаты серии экспериментальных проверок работоспособности и эффективности разработанной системы автоматизации. Экспериментальные исследования проводились на ряде модельных и реальных тестовых схем различной сложности (табл. 1). Быстродействие приложения от количества блоков в указанных схемах приводится в рис. 7.

Цель испытаний – оценить, насколько применение разработанных многопараметрических методов улучшает качество размещения и сокращает время проектирования по сравнению с традиционными подходами. Для этого результаты, полученные с помощью MPGА, сопоставлялись с результатами классических алгоритмов (в частности, одноцелевой генетический алгоритм без специальных модификаций, а также некоторые эвристики, используемые в EDA-инструментах).

Таблица 1

Тестовые схемы

Тестовые схемы	Основа- ны на	Количество блоков	Количество связей	Размеры поля	Улучшение фитнеса (%)
Test_scheme	ISCAS 85 c432	170	6572	25 * 25	36
Small_scheme	ISCAS 85 S510	250	9386	35 * 35	41
Mid_scheme	ITC99 b05	1100	97564	125 * 100	53
Large_scheme	ISCAS 85 C5315	2500	436589	250 * 150	61
Big_scheme_1	ISCAS 89 s9234	6000	978563	300 * 250	64
Big_scheme_2	ISCAS 89 S15850	10500	1265891	350 * 350	72

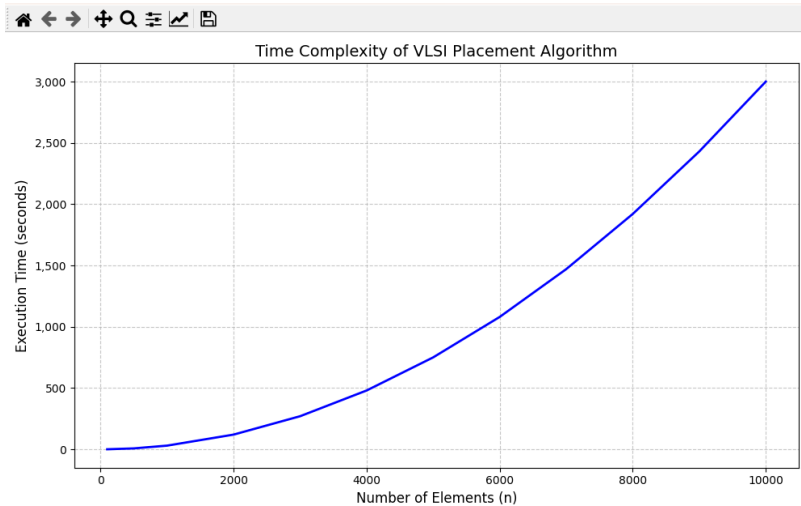


Рис. 7. Время работы приложения от количества блоков ИС

Проведено сравнение результатов с включённым и отключённым модулем специализированных субпопуляций, результаты которого приведены в табл. 2. Также произведена оценка по совокупности показателей: суммарная длина

межсоединений, количество и степень нарушений DRC, равномерность теплового распределения, мощность, а также паразитные эффекты (табл. 3).

Таблица 2

Влияние специализированных субпопуляций на результат размещения

Режим работы	$F(\pi)$	F_{wire}	$F_{thermal}$	F_{DRC}	F_{power}	$F_{parasitic}$
Со специализированными субпопуляциями	2204	306	0.27	4115	619	66549
Без специализированных субпопуляций	2906	345	0.34	4561	871	71208

Таблица 3

Сравнение многопараметрического и специализированных размещений

Метод размещения	Конфигурация:	Фитнес				
		межсоединений F_{wire}	теплового распределения: $F_{thermal}$	DRC: F_{DRC}	мощности: F_{power}	паразитных эффектов: $F_{parasitic}$
Многопараметрический	1/0.5/2.0 /0.3/0.2	306	0,27	4115	619	66549
Межсоединения	1/0/0/0/0	145	0,56	19205	540	87982
Тепловое распределение	0/1/0/0/0	395	0,18	6490	697	84196
DRC	0/0/1/0/0	393	0,22	3685	793	86841
Мощность	0/0/0/1/0	245	0,622	19450	297	84197
Паразитный эффект	0/0/0/0/1	320	0,46	10930	747	39756

На основе результатов исследований реализовано программное средство MPGA, содержащее быстродействующее вычислительное ядро на языке программирования C++17 и графический интерфейс пользователя на языке программирования Python. Такое разделение позволило обеспечить производительность вычислений и

одновременно простоту графического интерфейса. Вычислительное ядро благодаря своей простоте и наличию минимальных связей может быть легко интегрировано в другие подсистемы проектирования. С помощью программного средства можно легко управлять работой ядра, настраивать все параметры ГА и многопараметрической фитнес-функции, а также подсистему субпопуляций. Экспериментальные исследования показали, что программный инструмент обеспечивает производительную работу и предоставляет возможность распараллеливания вычислений. Графические сравнения свидетельствуют о том, что каждый специализированный режим успешно осознает свою приоритетную задачу, не теряя глобального качества в процессе основного комбинирования. Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают эффективность предложенных методов и достижение целей диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. На основе анализа литературы по существующим методам и соответствующим инструментам физического проектирования ИС обосновано, что разработка и применение таких методов и соответствующих высокопроизводительных программных средств, учитывающих важность учета многопараметрических методов, характерных для субмикронных технологий, стали актуальными в области физического проектирования ИС [6,8].
2. Представлена формализованная постановка задачи распределения компонент ИС как многопараметрической квадратичной задачи о назначениях, что позволило организовать решение задачи с использованием матричных методов расчета, используя высокоэффективный механизм матричной реализации генетических алгоритмов [2].
3. Предложен и реализован новый метод оптимизации размещения на основе эволюционного алгоритма со специализированными популяциями. Введен механизм разделения генетической популяции на специализированные субпопуляции, каждая из которых специализируется на оптимизации 1...2 параметров. Эти субпопуляции развиваются параллельно (также в распределенных вычислительных средах), что позволяет разрабатывать более глубокие и комплексные решения. Создан механизм обмена решениями между узлами (от рабочего узла до главного/мастер-узла) посредством сжатия данных, что позволяет объединять частичные оптимальные решения для получения глобального распределения, соответствующего многопараметрической задаче [1,4,7].
4. Предложена и реализована упрощенная система проверки DRC, основанная на алгоритмах квадродерева и отслеживания границ, обеспечивающая линейную сложность работы. Введен механизм адаптированной штрафной системы, что позволило эффективно включить разработанный механизм DRC в оператор создания новой популяции ГА. Это позволило сократить количество нарушений правил в 12 раз и тем самым упростить дальнейшие процедуры легализации, также на порядок

снижая количество итераций и временные затраты на физическое проектирование [3,5,6].

5. Предложена и реализована подсистема управляемых специализированных субпопуляций, управление которой осуществляет ГА, оптимизируя 1...2 параметра для каждой субпопуляции. Итоговая оптимизация привела к улучшению функции приспособленности на 10...20% и ускорению поиска решения на 50...60% [1,4].
6. Разработан программный комплекс MPGA, предназначенный для автоматизированного многопараметрического размещения элементов ИС. Он включает в себя высокопроизводительное вычислительное ядро на C++ и удобный графический интерфейс на Python. Разработанный программный инструмент протестирован на тестовых схемах различной сложности и показал улучшение фитнеса на 36...72%. Он эффективно размещает компоненты с учетом всех заданных параметров и обеспечивает более высокое качество по сравнению с традиционными подходами [1-8].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ревазян Д., Давтян В. Ускорение распределённой общей памяти за счёт сжатия данных // Вестник РАУ: Физико-математические и естественные науки.-2022.- №1.-С. 44-54. DOI: 10.48200/1829-0450_pmn_2022_1_44
2. Арутюнян А.Г., Ревазян Д.В. Применение модели квадратичного назначения для многопараметрического размещения элементов интегральных схем // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника.-2023.-№1.- С. 59–69. DOI: 10.53297/18293336-2023.1-59
3. Ревазян Д.В., Арутюнян А.Г. Проверка геометрических правил проектирования ортогональной топологии интегральных схем // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника.-2023.-№2.- С. 70-79. DOI: 10.53297/18293336-2023.2-70
4. Tuning Genetic Algorithm Parameters for Placement of Integrated Circuit Cells / V. Melikyan, A. Harutyunyan, V. Davtyan, D. Revazyan, et al // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).-2023 September.-P. 1-4. DOI: 10.1109/EWDTS59469.2023.10297063
5. Revazyan D.V., Harutyunyan A.G., Davtyan V.R. Integration of design rule checking into genetic algorithm for integrated circuits elements placement // ISPC “MIET-2024”: International Scientific-practice Conference, May 27-29 2024.-Odesa, 2024.-P. 11-12.
6. Multiparametric Optimization and Penalty System in Integrated Circuit Component Placement / V. Melikyan, D. Revazyan, A. Harutyunyan, et al // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).-2024 November.-№21.-P. 1-4. DOI: 10.1109/EWDTS63723.2024.10873782
7. Novel Adaptive Crossover Mechanism for Genetic Algorithm on Integrated Circuit Cell Placement / V. Melikyan, V. Davtyan, A. Harutyunyan, D. Revazyan, et al //

8. Revazyan D.V. Review of multi-parametric optimization in Physical Design of Integrated Circuits // Proceedings of NPUA: Information technologies, Electronics, Radio engineering. -2024.-№2.-P. 9-23. DOI: 10.53297/18293336-2024.2-9

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից ենթամիկրոնային ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) տեխնոլոգիաները բնութագրվում են տարրերի խտության անշեղ աճով և գործառնությունների բարդացմամբ, ինչը հանգեցնում է նախագծման ժամանակ հաշվի առնվող ֆիզիկական երևույթների թվի զգալի ավելացման (ջերմային երևույթներ, մակաբույծ ունակություններ և ինդուկտիվություններ, էլեկտրամիգրացիա, կրիտիկական ժամանակային հապաղումներ և այլն): Միաժամանակ խստանում են էներգասպառման, զբաղեցրած մակերեսի, նախագծման ժամկետների, ինչպես նաև տեխնոլոգիական նորմերի և նախագծման կանոնների (DRC) պահպանման պահանջները:

Ավանդական ֆիզիկական նախագծման մեթոդները հիմնականում ուղղված են մեկ կամ երկու չափանիշների օպտիմալացմանը (որպես կանոն, միջմիացումների երկարության նվազեցումը), ընդ որում մնացած պարամետրերը դիտարկվում են միայն սահմանափակումների տեսքով և հաճախ անտեսվում են այնպիսի կարևոր ասպեկտներ, ինչպիսիք են ջերմային ռեժիմը, ազդանշանների հապաղումները, էլեկտրամագնիսական համատեղելիությունը և այլն:

Ամեն նոր սերնդի տեխնոլոգիաների հետ պարամետրերի փոխակախվածությունն աճում է, իսկ մշակման խիստ ժամկետները պահանջում են ավտոմատացված նախագծման միջոցների շարունակական կատարելագործում: Խնդիրների էական բարդացումը և լուծումների որակի նկատմամբ բարձրացված պահանջները արդիականացնում են ԻՍ-երի ֆիզիկական նախագծման բազմապարամետրական մեթոդների և գործիքների ստեղծման խնդիրը, որոնք թույլ են տալիս գտնել նպատակահարմար փոխզիջում տարբեր չափանիշների միջև:

Ատենախոսությունում առաջարկվել է ԻՍ-երի տարրերի բազմապարամետրական տեղաբաշխման խնդրի համալիր մոտեցում՝ հիմնված էվոլյուցիոն ալգորիթմների վրա, որը հնարավորություն է տալիս տեղաբաշխման վաղ փուլերում միաժամանակ հաշվի առնել մի քանի չափանիշներ (միջմիացումների երկարություն, ջերմային էֆեկտներ, ժամանակային հապաղումներ, նախագծման կանոններ և այլն):

Առաջադրվել և իրականացվել է գենետիկական ալգորիթմ (ԳԱ) ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման համար, որում ներդրվել է «մասնագիտացված ենթապոպուլյացիաների» մեխանիզմ, որոնցից յուրաքանչյուրը հաշվի է առնում 1-2 առանցքային պարամետրեր: Փորձնական արդյունքները ցույց են տվել, որ մասնագիտացված ենթապոպուլյացիաները թույլ են տալիս զուգահեռ կատարել

հաշվարկները, արագեցնում են համակցումը, և մոտ 20% ուլ լավացնում տեղաբաշխման որակը:

Մշակվել է նաև նախագծման կանոնների (DRC) ինտեգրման մեխանիզմ՝ գեներտիկական ալգորիթմի հարմարվողականության ֆունկցիայում տուգանքների համակարգի ներդրման միջոցով, որը թույլ է տվել գրեթե 12 անգամ փոքրացնել նախագծման կանոնների խախտումները: Նաև առաջարկվել է տոպոլոգիական տվյալների մշակման արդյունավետ մեթոդ՝ հիմնված քառածառերի և միասնական տվյալների կառուցվածքի օգտագործման վրա, որն ապահովում է երկրաչափական նախագծման կանոնների արագ ստուգում, գծային բարդությամբ: Մշակվել է նաև գեներտիկական տվյալների փոխանցման ժամանակ տվյալների սեղմման մեխանիզմ հաշվարկային հանգույցների միջև:

Մշակվել է ծրագրային համակարգ՝ MPGA, որն իրականացնում է առաջարկված ալգորիթմները և հնարավորություն է տալիս հաշվի առնել բազմաթիվ պարամետրեր ԻՍ-ի տեղաբաշխման ընթացքում: Փորձնական հետազոտությունները ցույց են տվել, որ համակարգը գերազանցում է ավանդական մոտեցումներին ինչպես տեղաբաշխման որակի, այնպես էլ հաշվարկման ժամանակի առումով:

Աշխատանքի արդյունքները կարող են կիրառվել ինտեգրալ սխեմաների ավտոմատացված նախագծման համակարգերում՝ բարձրացնելով մշակման արդյունավետությունը և նվազեցնելով նախագծման ժամանակը:

DAVIT VARDAN REVAZYAN

DEVELOPMENT OF MULTIPARAMETER AUTOMATED TOOLS FOR THE PHYSICAL DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS

SUMMARY

Modern submicron integrated circuit (IC) technologies are characterized by a steady increase in element density and functional complexity, resulting in a significant increase in the number of physical phenomena considered during design (thermal effects, parasitic capacitances and inductances, electromigration, critical time delays, etc.). Simultaneously, requirements become more stringent for energy consumption, occupied area, design deadlines, as well as compliance with technological standards and design rules (DRC).

Traditional physical design methods are mainly aimed at optimizing one or two criteria (typically, minimizing interconnection length), while other parameters are considered only as constraints, and important aspects such as thermal conditions, signal delays, electromagnetic compatibility, and others are often ignored.

With each new generation of technologies, the interdependence of parameters increases, while strict development deadlines require continuous improvement of computer-aided design tools. The significant complication of tasks and increased quality

requirements for solutions make it urgent to create multi-parameter methods and tools for IC physical design that allow finding a rational compromise between various criteria.

The dissertation proposes a comprehensive approach to the multi-parameter placement of IC elements based on evolutionary algorithms, which allows simultaneously considering several criteria (interconnection length, thermal effects, time delays, design rules, etc.) at the early stages of placement.

A genetic algorithm (GA) for IC element placement has been proposed and implemented, incorporating a mechanism of "specialized subpopulations," each of which takes into account 1-2 key parameters. Experimental results have shown that specialized subpopulations allow parallel computation, accelerate convergence, and improve placement quality by approximately 20%.

A mechanism for integrating design rules (DRC) into the genetic algorithm's fitness function through a penalty system has also been developed, which has reduced design rule violations by almost 12 times. An efficient method for processing topological data has been proposed, based on the use of quadrees and a unified data structure, ensuring rapid verification of geometric design rules with linear complexity. A mechanism for compressing data during the transfer of genetic information between computational nodes has also been developed.

The MPGA software system has been developed, implementing the proposed algorithms and allowing consideration of multiple parameters during IC placement. Experimental studies have shown that the system outperforms traditional approaches in terms of both placement quality and computation time.

The results of this work can be applied in computer-aided design systems for integrated circuits, increasing development efficiency and reducing design time.

