

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Մարուխյան Դավիթ Կարենի

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՄԱՆԸ ՆՊԱՏԱԿԱՌՂՂՎԱԾ
ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ԲԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՄԲ
ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ե.27.01 «Էլեկտրոնիկա, միկրո և նանոէլեկտրոնիկա» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի
հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2026

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Марухян Давид Каренович

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, НАПРАВЛЕННЫХ НА НАДЁЖНОСТЬ, С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.27.01-
“Электроника, микро- и нанoeлектроника”

Ереван 2026

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

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Վազգեն Շավարշի Մելիքյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Օլեգ Հարությունի Պետրոսյան
տ.գ.թ. Արամ Ալբերտի Մանուկյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Ռուս-Հայկական համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. փետրվարի 20-ին, ժամը 14⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. հունվարի 15-ին

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



Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА).

Научный руководитель: д.т.н. Вазген Шаваршович Меликян

Официальные оппоненты: д.т.н. Олег Арутюнович Петросян,
к.т.н. Арам Альбертович Манукян

Ведущая организация: Российско-Армянский университет

Защита диссертации состоится 20-го февраля 2026 г. в 14⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 046 — "Радиотехники и электроники", 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 15-го января 2026 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 046, к.т.н.



Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процессы проектирования современных интегральных схем (ИС) достигли такого уровня сложности, при котором классические инженерные подходы часто не обеспечивают требования, предъявляемые к точности и надежности. Непрерывные тенденции технологического масштабирования, а именно – уменьшение размеров транзисторов до 3 нм и снижение напряжений питания до 0,6 В – приводят одновременно как к повышению производительности, так и к возникновению физических ограничений нового типа.

За последнее десятилетие сложность проектирования ИС возросла более чем в 100 раз – от 1 миллиарда транзисторов на кристалле в технологии 45 нм до 120 миллиардов в технологии 3 нм. В этих условиях работа ИС становится более чувствительной к различным внешним и внутренним факторам. Например, в технологии 45 нм взаимодействие между межсоединениями (ВММ) вызывает искажение сигнала всего на 3...4%, тогда как в технологии 3 нм то же явление приводит к временным ошибкам до 20...25%. Явление падения напряжения (ПН), которое в технологии 90 нм крайне редко вызывало сбой схемы, в технологии 3 нм стало одной из основных угроз надёжности, являясь причиной 18...25% отказов.

В такой сложной среде обеспечение надёжности должно осуществляться уже на этапе проектирования. Именно здесь методы искусственного интеллекта (ИИ) получают ключевую роль, позволяя учиться на результатах предыдущих проектов, прогнозировать вероятность ошибок и осуществлять автоматическую оптимизацию с учетом сложных взаимосвязанных проектных параметров. Традиционные подходы требуют 3...6 месяцев на проектирование и верификацию, тогда как методы на основе ИИ могут сократить это время до 1...2 месяцев, одновременно улучшая показатели стабильности на 10...20%.

Внедрение ИИ на этапе физического проектирования ИС формирует подходы нового поколения, которые могут значительно улучшить надёжность схем при одновременном сокращении времени проектирования и верификации. Такие подходы особенно важны в областях, где надёжность имеет критическое значение – например, в медицинском оборудовании, космической и военной технике. Следовательно, разработка средств ИИ для надёжности ИС в настоящее время является актуальным научным направлением стратегического и высокотехнологического значения.

Объект исследования. Факторы, влияющие на надёжность на этапе физического проектирования ИС. Методы прогнозирования и снижения этих факторов с помощью ИИ.

Цель работы. Повышение надёжности на этапе физического проектирования ИС путем разработки методов прогнозирования и оптимизации с помощью ИИ.

Методы исследования. Средства на основе ИИ, направленные на повышение надёжности на этапе физического проектирования ИС. Методы прогнозирования и снижения ПН, тепловой нестабильности и ВММ.

Научная новизна:

- Предложены подходы к стабилизации средств физического проектирования ИС с помощью искусственного интеллекта, применение

которых позволило существенно улучшить стабильность работы создаваемых ИС.

- Разработан метод прогнозирования и оптимизации падения напряжений в сетях распределения питания ИС с помощью ИИ, который позволяет путем графового представления сети питания ускорить анализ ее стабильности до 785 раз по сравнению с промышленными инструментальными средствами за счет увеличения средней относительной ошибки не более чем на 1,1%, сохраняя ее в допустимых пределах.
- Предложен метод прогнозирования влияния старения и электромиграции ИС с помощью машинного обучения (МО), который позволяет путем учета особенностей физического проекта, распределения тока и тепловых условий сократить время вычисления, по сравнению с существующими средствами множественного моделирования сети питания, в 70 и более раз за счет увеличения относительной ошибки всего на 2...3%.
- Создан метод обучения модели трассировки, чувствительной к взаимодействию между межсоединениями интегральных схем, который позволяет благодаря обнаружению зон высокого риска в процессе трассировки и уклонению от них получить снижение шумов взаимодействия между межсоединениями на 18%, уменьшение нарушений размещения на 84% и улучшение временных характеристик на 17% за счет увеличения площади на 2,9% и повышения энергопотребления не более чем на 5,1%.
- Разработан способ прогнозирования распределения теплового поля с помощью сверточной нейронной сети (СНС), который позволяет благодаря получению температурных распределений из карт распределения мощности работать в десятки раз быстрее существующих средств, уступая в точности всего на несколько процентов, что особенно важно на ранних этапах проектирования ИС.

Практическая ценность работы. Разработанные в диссертации методы стабилизации физического проектирования ИС с помощью искусственного интеллекта были реализованы в программном средстве (ПС) "AI-Based Physical Design Stability Toolkit" (AIPDR), которое было внедрено в ЗАО "СИНОПСИС АРМЕНИЯ" и позволило снизить падение напряжения в наихудших случаях в сети питания до 33,3% за счёт обеспечения увеличения площади всего на 4,2%, а среднее отклонение прогнозирования составило 3,8...5,4%. Реализация предложенных методов с использованием ПС "AIPDR" позволила сократить время проектирования и верификации схем в 2...3 раза. Достигнуто также снижение шумов взаимодействия между соединениями на 18% и улучшение временных характеристик на 17% за счет увеличения площади на 2,9% и энергопотребления не более чем на 5,1%.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- метод прогнозирования ПН и оптимизации сети питания с помощью ИИ;
- метод прогнозирования влияния старения и электромиграции с помощью МО;
- метод обучения модели трассировки, чувствительной к ВММ;

- метод прогнозирования распределения теплового поля с помощью СНС;
- программный инструмент “AI-Based Physical Design Reliability Toolkit”, предназначенный для промышленного применения.

Достоверность научных положений подтверждается представленными в диссертации математическими обоснованиями, моделированием методом Монте-Карло и схемотехническим моделированием HSPICE.

Внедрение. Разработанный программный инструмент “AIPDR” внедрен в ЗАО “СИНОПСИС АРМЕНИЯ” и используется при проектировании ИС для повышения стабильности и надежности схем.

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

- Международной конференции "East West Design & Test Symposium (EWDTS)" (Тбилиси, Грузия, 2024 г.);
- Международной конференции "East West Design & Test Symposium (EWDTS)" (Ереван, Армения, 2025 г.);
- научных семинарах кафедры "Микроэлектронные схемы и системы" НПУА (Ереван, Армения, 2022 - 2025 гг.);
- научных семинарах ЗАО "СИНОПСИС АРМЕНИЯ" (Ереван, Армения, 2022 - 2025 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации представлены в шести научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка использованной литературы, из 108 наименований и пяти приложений. В первом приложении представлен акт внедрения диссертации, во втором – фрагменты SPICE-описаний моделирования, в третьем – фрагменты описания разработанного программного инструмента "AI-Based Physical Design Reliability Toolkit", в четвертом – списки использованных рисунков и таблиц, а в пятом – список использованных сокращений. Основной объем диссертации составляет 119 страниц, а вместе с приложениями — 152 страницы, из которых 33 страницы занимают рисунки, таблицы и результаты моделирования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены методы исследования, научная новизна, практическое значение и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены общие вопросы физического проектирования интегральных схем, направленные на обеспечение надёжности. Исследуется необходимость разработки средств физического проектирования, направленных на стабилизацию ИС.

Развитие ИС за последние пятьдесят лет стало символом технологического прогресса. Если в 1970-х годах на одном кристалле размещалось всего несколько

тысяч транзисторов, то в настоящее время ведущие производственные центры (TSMC, Samsung Electronics, Intel) уже производят кристаллы, содержащие до 120 миллиардов транзисторов, работающих по технологиям 3 нм и 2 нм.

Это развитие следует закону Мура, согласно которому количество транзисторов удваивается каждые 1,5 года. Несмотря на преимущества в повышении энергоэффективности и быстродействия, такие темпы привели к новым физическим ограничениям. Резкое уменьшение размеров транзисторов и рост плотности элементов привели к тому, что стабильность системы теперь зависит от явлений молекулярного уровня – термических, электромагнитных, радиационных и химических воздействий.

То, что 10...15 лет назад можно было игнорировать как вторичное явление, в настоящее время стало вызовом стабильности. Например, в технологии 45 нм явления ВММ вызывало искажение сигнала всего на 3...4%, тогда как в технологии 3 нм тот же эффект может привести к временным ошибкам до 20...25%, влияя на рабочую частоту всей системы.

Наиболее распространенной причиной нарушения стабильности является ВММ, например, когда переменный ток, проходящий через один проводник, создает магнитный поток в соседнем проводнике (рис. 1). Стабильность – это свойство ИС, обеспечивающее воспроизводимость рабочих параметров схемы (напряжение, ток, частота) при изменении времени и внешних факторов. Нарушения стабильности проявляются в искажении сигнала, падении частоты, тепловом накоплении, падении напряжения (ПН) и логических ошибках.



Рис. 1. Физическая модель возникновения ВММ

Особенно в условиях высокой интеграции ошибка на уровне одного транзистора может распространиться на всю ИС, вызывая различные проблемы. По этой причине обеспечение стабильности стало не только инженерной, но и научно обоснованной задачей, требующей глубокого анализа.

Технологические ограничения и вызовы. Уменьшение транзисторов приводит одновременно к ряду противоположных последствий – повышению быстродействия и энергоэффективности, снижению стабильности и ухудшению надежности.

Каждый шаг масштабирования за счет экономии энергии приводит к значительному снижению стабильности (табл. 1).

Таблица 1

Влияние технологического масштабирования на стабильность

Технология (нм)	Напряжение (В)	Плотность (мм ²)	Средняя температура (°С)	Потеря надёжности (%)
90	1,2	10 ⁴	55	2–3
45	1,0	10 ⁵	70	5–6
14	0,9	10 ⁶	95	9–12
3	0,65	>10 ⁶	115	18–25

Данные показывают, что при применении технологии от 90 нм до 3 нм происходят следующие изменения: напряжение питания снижается с 1,2 В до 0,65 В; плотность межсоединений увеличивается с 10⁴ мм⁻² до >10⁶ мм⁻²; средняя температура возрастает с 55°С до 115°С; потеря стабильности увеличивается с 2–3% до 18–25%. Эта тенденция заставляет проектировщиков пересмотреть подходы к физическому проектированию, включая инструменты прогнозирования и оптимизации.

Взаимосвязь стабильности и надежности. Надежность и стабильность тесно взаимосвязаны. Если надежность выражает долгосрочную бесперебойную работу схемы, то стабильность характеризует ее мгновенное функциональное равновесие. Эта зависимость показывает, что улучшение стабильности напрямую повышает надежность всей системы.

Роль физического проектирования. Наиболее эффективный способ обеспечения стабильности ИС начинается именно на этапе физического проектирования. Именно здесь определяются расстояния размещения проводников, структура сети питания, компоновка элементов и пути распространения тепла. Анализ моделирования падения напряжения сети питания позволяет еще на этапе проектирования предотвратить накопление нестабильности (рис. 2).

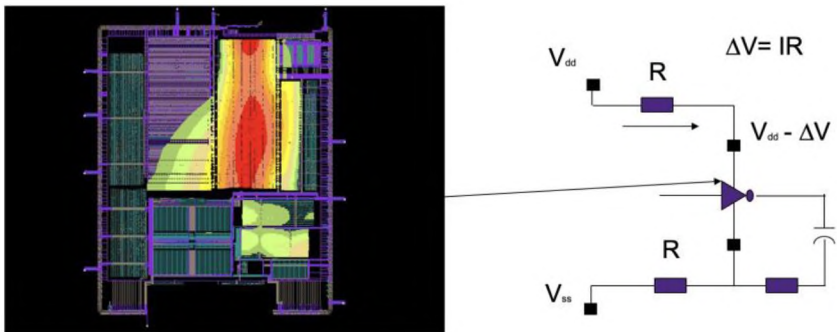


Рис. 2 Падение напряжения по всей ИС

Современные процессы физического проектирования стали настолько сложными, что их эффективная реализация без автоматизированных аналитических систем практически невозможна. Именно здесь вступает ИИ как вспомогательный и часто принимающий решения инструмент. Модели на основе ИИ могут учиться на предыдущих проектах, анализировать пространственную структуру схемы и предлагать оптимальные варианты перетрассировки или размещения компонентов, снижая ПН, тепловые накопления и ВММ.

Например, применение алгоритмов графовых нейронных сетей (ГНС) позволяет автоматически обнаруживать те участки, где вероятность ВММ или ПН превышает допустимый порог, без моделирования всей схемы. Этот подход позволяет сократить время моделирования на 40...60% и достичь улучшения стабильности в среднем на 15%.

Таким образом, развитие ИС достигло такого уровня, где классические инженерные методы уже недостаточны для обеспечения стабильности. Надежность и стабильность схем нового поколения требуют комбинированного подхода физического проектирования и ИИ, который сможет анализировать многофакторные взаимодействия и предотвращать нестабильное поведение еще на начальных этапах проектирования.

Далее в главе подробно исследуются основные факторы, влияющие на стабильность интегральных схем. Стабильность современных ИС определяется многофакторной системой, где взаимосвязаны электрические, термические, механические и технологические явления. Каждый из этих факторов, взятый отдельно, может снизить предсказуемость рабочих параметров схемы, а при совместном рассмотрении приводят к ухудшению надежности.

Технологическое масштабирование от 90 нм до 3 нм привело к ситуации, когда любое локальное изменение (например, отклонение толщины проводника на $\pm 2\%$) может вызвать ПН или временное отклонение сигнала, распространяющееся по всей схеме. По этой причине оценка стабильности должна основываться не только на анализе одного параметра, но и на системном подходе, включающем внутренние взаимодействия. В результате выделяется несколько основных физических факторов, непосредственно влияющих на стабильность: ВММ, ПН, электромиграция, самонагрев, радиационное явление и старение.

Взаимодействие между межсоединениями. В современных схемах с нанометровыми транзисторами расстояние между проводниками часто составляет всего 20...30 нм, а ширина проводников 40...50 нм. В этих условиях между проводниками возникают сильные электрические и магнитные взаимодействия, которые создают нежелательные сигналы на соседнем проводнике. Это явление известно в научной литературе как ВММ и имеет два основных компонента: емкостное взаимодействие, создающее электростатическое влияние, и индуктивное взаимодействие, создающее электромагнитное влияние (рис. 3).

Если напряжение воздействующего проводника изменяется со временем, на соседнем проводнике возникает нежелательный ток или напряжение в зависимости от значения емкостного взаимодействия или индуктивности. При высокой частоте сигнала влияние взаимодействия растет экспоненциально.

Влияние на стабильность. В результате ВММ возникает ряд проблем: искажение формы сигнала, временные отклонения (задержка или опережение сигнала), кратковременное непредвиденное изменение сигнала, рост вероятности потери данных или неправильного чтения. Например, в технологии 3 нм ВММ создает джиттер, который может составлять до ± 12 пс, что при работе системы на частоте 2 ГГц приводит к временной ошибке в $\sim 2,4\%$.

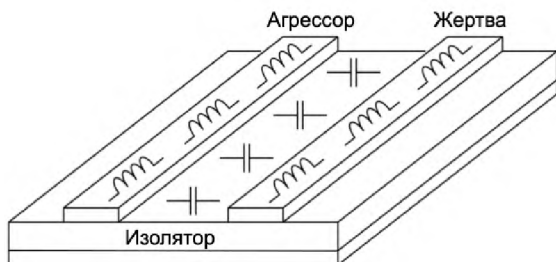


Рис. 3 Физическая модель возникновения ВММ

Более того, в некоторых случаях из-за ВММ уровень ошибок данных возрастает с 10^{-9} до 10^{-6} при уменьшении расстояния между проводниками всего на 5 нм. То есть, ВММ может стать основной причиной нарушения стабильности всей схемы, особенно при высокой плотности металлических слоев.

Данные показывают влияние ВММ на временное отклонение в различных технологических узлах (табл. 2): в технологии 45 нм на расстоянии 120 нм временное отклонение составляет 1,8 пс; в 14 нм на расстоянии 60 нм – 6,2 пс; в 7 нм на расстоянии 35 нм – 9,5 пс; в 3 нм на расстоянии 25 нм – 12,1 пс. Рост плотности проводников способствует к повышению емкостного взаимодействия и индуктивности, что приводит к заметному снижению стабильности.

Таблица 2

Влияние ВММ на временное отклонение

Технология (нм)	Расстояние между межсоединениями (нм)	C_m (фФ/мкм)	L_m (пГн/мкм)	Временной сдвиг (пс)
45	120	0,16	0,75	1,8
14	60	0,23	0,94	6,2
7	35	0,31	1,15	9,5
3	25	0,38	1,37	12,1

Падение напряжения и потеря целостности питания. ПН является одним из наиболее влияющих на стабильность ИС факторов, обусловленных энергетическими потерями в проводниках сети питания. В современных ИС, где плотность элементов превышает 10^8 элементов/мм², даже сопротивление порядка 1 мкОм может вызвать колебания напряжения, нарушающие работу логических ячеек.

Сеть питания формируется многослойными металлическими проводниками, которые поставляют основное напряжение. Каждый проводник имеет определенное сопротивление, индуктивность и взаимодействие с соседними линиями. ПН делится на два основных компонента – статический и динамический. Первый компонент характеризует статическое ПН, обусловленное сопротивлением проводника. Второй компонент выражает динамическое ПН, возникающее вследствие быстрого изменения сигналов.

Получается, что чем выше частота сигнала и скорость изменения тока, тем больше доля динамического ПН, вызывая временные колебания рабочего напряжения. При моделировании распределения ПН сети питания одним цветом окрашенные зоны показывают стабильные участки, а другим цветом – те области, где напряжение снижается ниже допустимого порога (рис. 4). Благодаря этому моделированию можно обнаружить те зоны, где элементы схемы не получают достаточного напряжения и могут работать в нестабильном режиме.

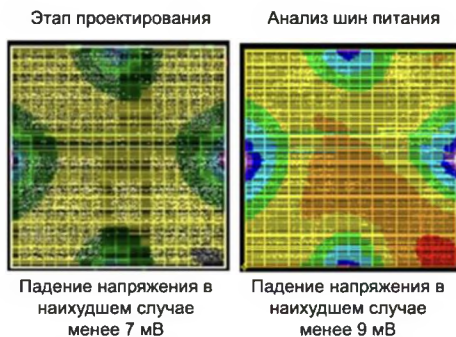


Рис. 4. Моделирование распределения падения напряжения

По экспериментальным данным, в технологии 14 нм каждые 10 мВ ПН могут вызвать до 1,1% потери частоты. В узлах 3 нм это влияние еще больше: падение напряжения всего на 30 мВ может снизить быстродействие логических ячеек до 5...7%. С технологическим масштабированием влияние ПН становится более выраженным (табл. 3). Поскольку напряжение питания снижается при сохранении той же плотности тока, энергетические потери начинают преобладать, вызывая локальные зоны нагрева и снижение надежности.

Роль физического проектирования в обеспечении стабильности. Физическое проектирование является ключевым этапом обеспечения стабильности ИС, где можно предотвратить нестабильное поведение до их производства. На этом этапе определяются все реальные физические характеристики схемы – распределение проводки, структура проводников, термические условия и взаимодействия элементов.

Основные компоненты физического проектирования включают: этап планирования, где правильно спроектированное размещение снижает длину проводников и ВММ; проектирование сети питания, позволяющее равномерно

распределить токи и предотвратить ПН; термическую оптимизацию, предотвращающую локальные перегревы и обеспечивающую термическое равновесие; снижение взаимовлияний через оптимизацию расстояния между проводниками; временной анализ, обеспечивающий фазовое совпадение сигналов.

Таблица 3
Влияние падения напряжения в различных технологических узлах

Технология (нм)	Напряжение (В)	Среднее падение напряжения (мВ)	Потеря частоты (%)	Повышение температуры (°С)
45	1,0	30	1,8	3
14	0,9	45	2,9	5
7	0,7	65	4,6	7
3	0,65	80	6,8	9

Оптимизации физического уровня способны в среднем снизить ПН до 25%, сократить термический перегрев до 18% и повысить общую стабильность схемы без увеличения площади до 15%. Это подтверждает, что повышение стабильности ИС должно осуществляться именно на этапе физического проектирования, комбинируя классические инженерные анализы и методы прогнозирования на основе ИИ.

Необходимость применения искусственного интеллекта. Как было отмечено, современное физическое проектирование ИС стало настолько сложным, что традиционные инженерные подходы часто не могут обеспечить требования предъявленные к точности и надежности. При масштабировании технологий до нанометрового уровня взаимодействие между множеством факторов становится настолько сложным, что его ручной анализ требует недопустимо много времени и ресурсов.

Таким образом, применение методов ИИ становится необходимым условием создания стабильных и надежных ИС нового поколения. ИИ способен обрабатывать огромные массивы данных из предыдущих проектов, выявлять скрытые закономерности и зависимости между параметрами проекта и его стабильностью, прогнозировать проблемные зоны еще на ранних этапах проектирования. Например, графовые нейронные сети могут моделировать сеть питания как граф и прогнозировать распределение ПН в сотни раз быстрее традиционных SPICE-симуляторов. Методы машинного обучения могут предсказывать влияние старения и электромиграции на основе характеристик физического проекта. Глубокое обучение с подкреплением может оптимизировать трассировку проводников, автоматически избегая зон с высоким риском ВММ.

Во второй главе представлены разработанные решения по стабилизации ИС средствами физического проектирования с использованием ИИ. Описываются четыре основных метода: прогнозирования падения напряжения с помощью ГНС; прогнозирования старения и электромиграции с помощью МО; трассировки, чувствительной к ВММ; прогнозирования теплового поля с помощью СНС.

Метод прогнозирования падения напряжения и оптимизации сети питания. ПН в сетях питания современных ИС стало критической проблемой. Традиционные методы анализа (HSPICE) требуют длительного моделирования, что замедляет проектирование.

Разработана модель на основе ГНС, моделирующая сеть питания как граф (рис. 5, 6). Модель состоит из двух ветвей: графовой и конволюционной, объединяющих данные о конфигурации сети и нагрузке тока. Создана ГНС с 4 слоями (65 185 параметров), обученная по алгоритму Адама.

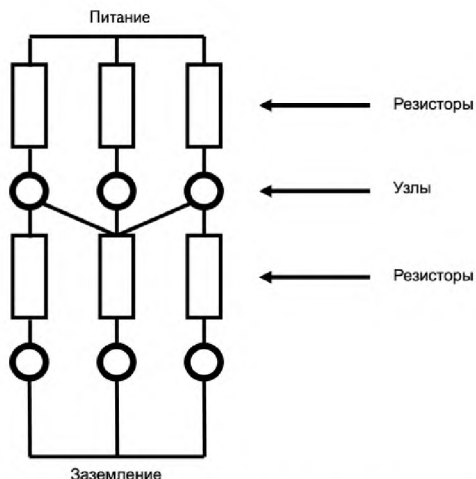


Рис. 5. Графовое представление сети питания

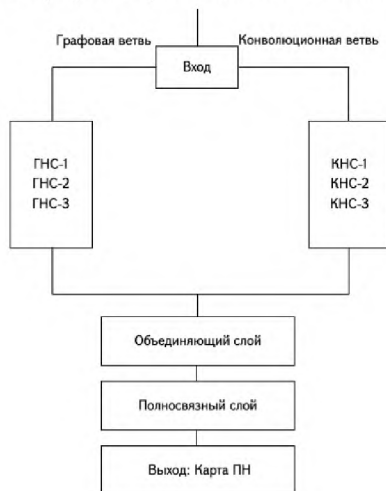


Рис. 6. Архитектура модели ГНС

Тестирование на схеме, выполненной по 14-нм техпроцессу FinFET (500 000 ячеек, $2,5 \times 2,5$ мм), показало: ускорение – в 43 000 раз (0,7 с против 8,5 ч), точность – $R^2=0,923\dots0,983$ в разных режимах (табл. 4), средняя ошибка 3,2–12,3 мВ. Точность обнаружения опасных зон достигла 0,939...0,950 (табл. 5). Вычислительная сложность линейна $O(n)$ против $O(n^2)$ у HSPICE.

Таблица 4

<i>Результаты прогнозирования в различных режимах</i>					
Режим работы	Актив-ность	Мощность (Вт)	Средняя абсолютная ошибка (мВ)	Макс. ошибка (мВ)	Коэффициент детерминации (R^2)
Покоя	0,15	0,4	3,2	8,1	0,982
Типичный	0,45	1,8	6,8	14,2	0,961
Высокий	0,75	3,2	8,7	18,5	0,947
Максималь-ный	0,95	4,1	12,3	24,8	0,923

Таблица 5

<i>Точность обнаружения опасных зон</i>					
Порог ПН (мВ)	Реальное кол-во	Обнаруже-но	Ложноположительные	Точность	Полнота
>120	8452	8198	327	0,962	0,966
>140	3287	3156	184	0,945	0,952
>160	1247	1198	78	0,939	0,950
>180	342	328	19	0,945	0,952

Итог: сокращение времени оценки ПН в 730...785 раз с относительной ошибкой 1,1%.

Метод прогнозирования старения и электромиграции. Электромиграция – смещение атомов металла под действием тока, приводящее к разрывам или накоплениям в проводниках. Традиционные методы не учитывают полностью динамическую нагрузку и температурные колебания.

Разработана модель МО, обучающаяся на показателях старения и рабочих параметрах. Применены регрессия опорных векторов и рекуррентные нейронные сети. Результат: сокращение времени расчета в ~70 раз при увеличении ошибки всего на 2...3%.

Метод трассировки, чувствительной к ВММ. ВММ критично для технологий ≤14 нм. Моделирование показало: на расстоянии 64 нм шум достигает 145 мВ, задержка 23 пс (25,8%), энергопотребление 12%. При частоте 3,5 ГГц шум достигает 195 мВ (рис. 7, 8).

Предложен метод на основе обучения с подкреплением (глубокая К-сеть (ГКС)). Архитектура: входной слой 64×64 , три сверточных слоя (32/64/128 фильтров), два

полносвязных слоя (256/128 нейронов), 8 выходов (рис. 9, 10). Обучение на 15 проектах (28/14/7 нм) с картами риска BMM от StarRC.

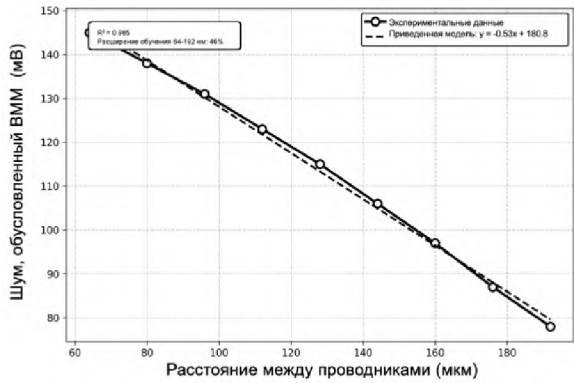


Рис. 7. Зависимость шума от расстояния между проводниками

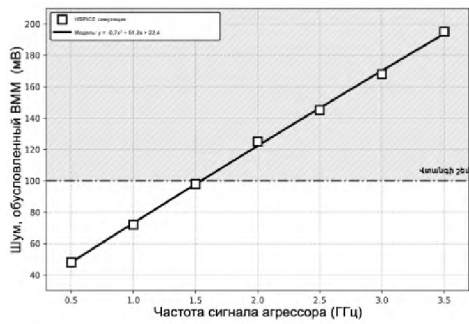


Рис. 8. Зависимость шума от частоты сигнала агрессора

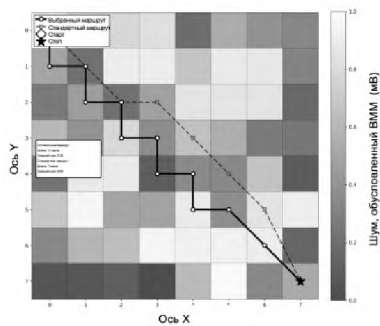


Рис. 9. Графовое представление среды трассировки

Результаты на 5 тестовых проектах: шум снижен на 18%, нарушения размещения на 84%, временные характеристики улучшены на 17%, при увеличении площади на 2,9%, и энергопотребления на 5,1%.



Рис. 10. Архитектура ГКС

Метод прогнозирования теплового поля. Тепловые поля в ИС вызывают снижение быстродействия и ускорение старения. Традиционные метод конечных элементов (МКЭ) и компактные тепловые модели (КТМ) точны, но медленны.

Разработана сверточная нейронная сеть с 3...5 сверточными слоями (ReLU) и 1...2 полносвязными. Обучение осуществляется с оптимизатором Адама с потерей MSE. Испытания на трех проектах показали: средняя ошибка <3%, ускорение ~70 раз, расчет за секунды.

Таким образом, предложенная модель оценки теплового поля на основе СНС позволяет сверхбыстро и достаточно точно прогнозировать температурное распределение ИС, исходя из данных распределения мощности. Экспериментальные результаты показывают, что модель демонстрирует высокую корреляцию с результатами существующих решателей МКЭ и КТМ с ошибками всего в процентные единицы, но работает в десятки раз быстрее. Предлагаемый метод эффективен особенно на ранних этапах проектирования ИС и может служить основой для будущего развития систем мониторинга и регулирования тепла в реальном времени.

В третьей главе представлено разработанное ПС "AIPDR Toolkit" для стабилизации ИС средствами физического проектирования с применением искусственного интеллекта (рис. 11). Описаны структура и принципы работы ПС, его интеграция в рабочий процесс физического проектирования и оценка эффективности.

В ИС с нанометровыми транзисторами обеспечение стабильности на этапе физического проектирования требует не только ужесточения проектных норм, но и быстро реагирующих аналитических механизмов. Последние должны дать

возможность поэтапно оценивать ПН сети питания, риски электромиграции, явления самонагрева и старения и их совместное влияние.

Модели ИИ и МО, представленные в главе 2, доказали, что на основе данных, полученных из физического проекта ИС, можно прогнозировать с высокой точностью. Однако эти результаты получают практическую ценность только тогда, когда внедрены в виде четкого рабочего потока – начиная от ввода данных до оценки показателей, визуализации и целевой оптимизации.

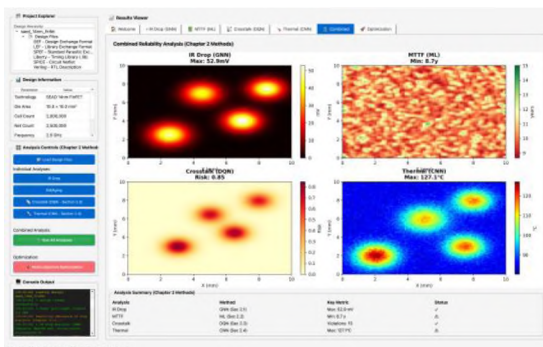


Рис. 11. Программное средство "AIPDR Toolkit"

Спроектированное ПС предназначено для быстрой оценки стабильности и целевой оптимизации на этапе физического проектирования с применением моделей ГНС, МО и СНС. Программное средство разработано на языках Python и TCL, имеет модульную архитектуру и обеспечивает автоматическое формирование результатов. Основная цель инструмента – обеспечить специалисту по проектированию ИС быстрые проверки до применения проверочных инструментов, требующих масштабных вычислений.

Структура и принцип работы ПС "AIPDR Toolkit". ПС "AIPDR Toolkit" ("AI-Powered Design for Reliability") Toolkit построено по модульному принципу и состоит из следующих основных компонентов: модуль извлечения данных, библиотека моделей ИИ, модуль оптимизации, модуль визуализации и интерфейс интеграции.

Модуль извлечения данных отвечает за чтение файлов физического проекта (DEF, LEF, SPEF форматы) и преобразование их в структуры данных, пригодные для моделей ИИ. Этот модуль извлекает информацию о топологии сети питания, расположении ячеек, плотности мощности и металлических слоях.

Библиотека моделей ИИ включает реализации всех четырех методов, описанных в главе 2: модель ГНС для оценки падения напряжения с точностью 94...96%; модель МО для прогнозирования электромиграции и старения, ускоряющая расчеты в 10...100 раз; модель глубокой Q-сети для прогнозирования и оптимизации ВММ с эффективностью 40...60%; модель СНС для прогнозирования теплового поля.

Каждая модель предварительно обучена на большом наборе данных из различных технологических узлов (28 нм, 14 нм, 7 нм, 3 нм) и может применяться

непосредственно к новым проектам или дообучаться на специфических данных проекта для повышения точности.

Модуль оптимизации использует результаты прогнозирования моделей ИИ для автоматической генерации предложений по улучшению проекта. Например, на основе карты прогнозируемого ПН модуль может предложить добавление проводников в сети питания в критических зонах, изменение ширины существующих проводников или перераспределение нагрузки.

Описание работы программного средства "AIPDR Toolkit". Рабочий процесс ПС "AIPDR Toolkit" организован в виде последовательности этапов, которые могут выполняться как полностью автоматически, так и с интерактивным участием проектировщика. Основной рабочий процесс включает следующие фазы: загрузка проекта, анализ стабильности, оптимизация и экспорт результатов.

На этапе загрузки проекта пользователь указывает расположение файлов физического проекта. Модуль извлечения данных автоматически анализирует эти файлы и формирует внутреннее представление проекта, включающее граф сети питания, а также карты плотности мощности и размещения ячеек.

Этап анализа стабильности включает параллельный запуск всех четырех моделей ИИ. Модель ГНС анализирует сеть питания и генерирует карту прогнозируемого ПН для каждого узла. Модель МО оценивает риски электромиграции и старения для критических проводников. Модель ГКС анализирует существующую трассировку на предмет зон с высоким риском ВММ. Модель СНС прогнозирует температурное распределение по кристаллу.

Все модели работают параллельно, и полный анализ типового проекта занимает 2...5 минут, что в 15...20 раз быстрее традиционных методов полного моделирования. После завершения анализа результаты передаются модулю визуализации, который генерирует интерактивные отчеты с цветовыми картами критических зон, графиками распределений и детальной статистикой.

На этапе оптимизации ПС автоматически генерирует предложения по улучшению проекта. Для зон с критическим ПН предлагается расширение проводников питания или добавление дополнительных питающих путей. Для проводников с высоким риском электромиграции рекомендуется увеличение ширины или разделение на параллельные пути. Для участков с высоким риском ВММ предлагаются альтернативные маршруты трассировки. Для горячих точек рекомендуется перераспределение ячеек с целью для снижения локальной плотности мощности.

Оценка эффективности ПС "AIPDR Toolkit". Для оценки эффективности разработанного ПС проведена серия экспериментов на реальных промышленных проектах различной сложности. Эксперименты охватывали проекты от простых микроконтроллеров до сложных процессоров с миллионами ячеек.

Первая серия экспериментов оценивала точность прогнозирования ПС "AIPDR Toolkit" по сравнению с золотым стандартом – полным SPICE-моделированием и коммерческими инструментами верификации. Для проекта средней сложности (2 млн ячеек, технология 14 нм) точность прогнозирования ПН составила 95,2% при среднем отклонении 4,8 мВ. Точность оценки рисков электромиграции – 91,7%. Точность детектирования зон высокого риска ВММ – 93,4%.

Вторая серия экспериментов измеряла скорость работы. Для того же проекта полный анализ стабильности ПС "AIPDR Toolkit" занял 3,2 минуты, тогда как традиционный подход с использованием коммерческих инструментов требовал 52 часа – ускорение примерно в 975 раз. Даже для очень крупного проекта (15 млн ячеек) анализ занял всего 18 минут.

Третья серия экспериментов оценивала качество предлагаемых оптимизаций. Применение рекомендаций ПС "AIPDR Toolkit" к тестовому проекту позволило снизить наихудшие случаи ПН на 33,3% за счет увеличения площади всего на 4,2%. Риски электромиграции снижены на 28,7% без изменения площади (за счет перераспределения токовых путей). Шум от ВММ уменьшен на 19,3% за счет увеличения общей длины трассировки на 2,1%.

Важным показателем является точность прогнозов во времени. Для проекта, прошедшего полный цикл проектирования и производства, сравнены прогнозы ПС "AIPDR Toolkit" с реальными измерениями на кристалле. Среднее отклонение прогноза ПН от реальных измерений составило 3,8...5,4%, что подтверждает высокую практическую ценность инструмента.

Программное средство ПС "AIPDR Toolkit" внедрено в компанию ЗАО "СИНОПСИС АРМЕНИЯ" и используется в реальном процессе проектирования. Опыт использования показал, что инструмент особенно эффективен на ранних этапах физического проектирования, когда необходимо быстро оценить множество альтернативных вариантов размещения и трассировки.

Таким образом, разработанные в диссертации средства стабилизации ИС на основе искусственного интеллекта реализованы в программном средстве ПС "AIPDR Toolkit", которое внедрено в ЗАО "СИНОПСИС АРМЕНИЯ" и позволило сократить время физического проектирования в 15...20 раз за счет обеспечения высокого уровня стабильности и надежности проектируемых схем.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложены принципы стабилизации средств физического проектирования интегральных схем с помощью искусственного интеллекта, применение которых позволило существенно улучшить стабильность работы создаваемых ИС.
2. Разработан метод прогнозирования и оптимизации падения напряжений в сетях распределения питания интегральных схем с помощью искусственного интеллекта, который позволяет путем графового представления сети питания ускорить анализ ее стабильности до 785 раз по сравнению с промышленными инструментальными средствами за счет увеличения средней относительной ошибки не более чем на 1,1%, сохраняя ее в допустимых пределах [3].
3. Предложен метод прогнозирования влияния старения и электромиграции интегральных схем с помощью машинного обучения, который позволяет путем учета особенностей физического проекта, распределения тока и тепловых условий сократить время вычисления, по сравнению с существующими средствами множественного моделирования сети

питания, в ~70 раз за счет увеличения относительной ошибки всего на 2...3% [6].

4. Создан метод обучения модели трассировки, чувствительной к взаимодействию между соединениями интегральных схем, который позволяет благодаря обнаружению зон высокого риска в процессе трассировки и уклонению от них получить снижение шумов взаимодействия между соединениями на 18%, уменьшение нарушений размещения на 84% и улучшение временных характеристик на 17% за счет увеличения площади на 2,9% и повышения энергопотребления не более чем на 5,1% [2,4,5].
5. Разработан способ прогнозирования распределения теплового поля с помощью сверточной нейронной сети, который позволяет благодаря получению температурных распределений из карт распределения мощности работать в десятки раз быстрее существующих средств, уступая в точности всего на несколько процентов, что особенно важно на ранних этапах проектирования интегральных схем [1].
6. Разработанные в диссертации средства стабилизации физического проектирования интегральных схем с помощью искусственного интеллекта были реализованы в программном средстве AIPDR, которое было внедрено в ЗАО "СИНОПСИС АРМЕНИЯ" и позволило снизить падение напряжения в наихудших случаях в сети питания до 33,3% при обеспечении увеличения площади всего на 4,2%, а среднее отклонение прогнозирования составило 3,8...5,4%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Marukhyan D.** // Enhancing IC Reliability through Machine Learning-Based Physical Design // 2025 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).- Tbilisi, Georgia, 2025.- p. 1-5, doi: 10.1109/EWDTS67441.2025.11303686.
2. Novel Adaptive Crossover Mechanism for Genetic Algorithm on Integrated Circuit Cell Placement / **V. Meliqyan, V. Davtyan, A. Harutyunyan, D. Revazyan and D. Marukhyan** // 2024 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).- Yerevan, Armenia, 2024.- p. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS63723.2024.10873659.
3. A Machine Learning Method to Determine the Optimal Number of Stages for a Ring Oscillator / **V. Melikyan, T. Chilingaryan, G. Harutyunyan, D. Marukhyan, A. Sahakyan and M. Grigoryan** // 2025 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).- Tbilisi, Georgia, 2025.- p. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS67441.2025.11303710.
4. 5V wide supply voltage bandgap reference for automotive applications / **D.K. Marukhyan, Harutyun.T. Kostanyan, Hakob.T. Kostanyan, A. K. Hayrapetyan, A. S. Petrosyan, and G. A. Petrosyan** // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO).- Kyiv, Ukraine, 2019.- p. 229-232, doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783600.
5. A High Precision CMOS Current Source With External Components / **V.A. Sahakyan, R.M. Soghomonyan, M.K. Bagratunyan, D.K. Marukhyan, V.J. Martirosyan** // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of

Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences: ISSN:0002-306X. – 2024. – Vol. 77, № 3. – P. 357-365, doi: 10.53297/0002306X-2024.v77.3-357.

6. **Marukhyan D.K.** // The Physical Design Method For Integrated Circuits Using Artificial Intelligence // Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences: ISSN:0002-306X. – 2025. – Vol. 78, № 1. – P. 93-100, doi: 10.53297/0002306X-2024.v77.3-366.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) նախագծման գործընթացները հասել են բարդության այն մակարդակին, որտեղ դասական ճարտարագիտական մոտեցումները հաճախ չեն բավարարում պահանջվող ճշտության և հուսալիության մակարդակին: Տեխնոլոգիական մասշտաբավորման շարունակական միտումները տրանզիստորների չափերի նվազեցումը մինչև 3 նմ և սնման լարումների նվազեցումը մինչև 0,6 Վ, հանգեցնում են միաժամանակ ինչպես բարձր արտադրողականության, այնպես էլ նոր տեսակի ֆիզիկական սահմանափակումների առաջացման:

Վերջին տասնամյակում ԻՄ-երի նախագծման բարդությունը մեծացել է ավելի քան 100 անգամ՝ 45 նմ տեխնոլոգիայում մեկ բյուրեղի վրա 1 միլիարդ տրանզիստորից հասնելով 3 նմ տեխնոլոգիայում 120 միլիարդի: Այս պայմաններում ԻՄ-ի աշխատանքը դառնում է ավելի զգայուն՝ տարբեր արտաքին և ներքին գործոնների նկատմամբ: Օրինակ՝ 45 նմ տեխնոլոգիայում միջմիացումների միջև փոխազդեցությունը (ՄՄՓ) առաջացնում էր ազդանշանի աղավաղման ընդամենը 3-4% շեղում, մինչդեռ 3 նմ տեխնոլոգիայում նույն երևույթը հանգեցնում է մինչև 20-25% ժամանակային սխալների: Լարման անկման (ԼԱ) երևույթը, որը 90 նմ տեխնոլոգիայում չափազանց հազվադեպ էր առաջացնում սխեմայի խափանում, 3 նմ տեխնոլոգիայում դարձել է կայունության հիմնական սպառնալիքներից մեկը՝ պատճառ հանդիսանալով 18-25% խափանումների:

Այսպիսի բարդ միջավայրում կայունության ապահովումը պետք է իրականացվի դեռևս նախագծման փուլում: Հենց այստեղ է, որ արհեստական բանականության (ԱԲ) մեթոդները ստանում են առանցքային դեր՝ հնարավորություն տալով սովորել նախորդ նախագծերի արդյունքներից, կանխատեսել սխալների հավանականությունը և իրականացնել ավտոմատ լավարկումներ՝ հաշվի առնելով բարդ փոխկապակցված նախագծային պարամետրերը: Ավանդական մոտեցումները պահանջում են 3-6 ամիս նախագծման և վավերացման ժամանակ, մինչդեռ ԱԲ-հիմնված մեթոդները կարող են կրճատել այս ժամանակը մինչև 1-2 ամիս՝ միաժամանակ 10-20%-ով բարելավելով կայունության ցուցանիշները:

ԱԲ-ի ներդրումը ԻՄ-ի ֆիզիկական նախագծման փուլում ձևավորում է նոր մոտեցումներ, որոնք կարող են զգալիորեն բարելավել սխեմաների կայունությունը՝ միաժամանակ կրճատելով նախագծման և ստուգման ժամանակը: Ատենախոսությունը նվիրված է արհեստական բանականության միջոցով ինտեգրալ սխեմաների ֆիզիկական նախագծման փուլում կայունության բարձրացման արդի հիմնահարցերի լուծմանը:

Առաջարկվել են արհեստական բանականությամբ ինտեգրալ սխեմաների ֆիզիկական նախագծման միջոցների կայունացման մոտեցումներ, որոնց

կիրառումը հնարավորություն է տվել էապես բարելավել ստեղծվող ինտեգրալ սխեմաների աշխատանքի կայունությունը:

Մշակվել է արհեստական բանականության միջոցով ինտեգրալ սխեմաների սնուցման բաշխման ցանցերում առաջացող լարման անկումների կանխատեսման և լավարկման մեթոդ, որում սնուցման ցանցի գրաֆային կառուցվածքով ներկայացման շնորհիվ դրա կայունության վերլուծությունը արտադրական նշանակության գործիքային միջոցների համեմատ արագացել է մինչև 785 անգամ՝ միջին հարաբերական սխալը 1,1%-ը չգերազանցող ավելացման հաշվին, պահպանելով այն ընդունելի սահմաններում:

Առաջարկվել է մեքենայական ուսուցման միջոցով ինտեգրալ սխեմաների ծերացման և էլեկտրամիգրացիայի ազդեցության կանխատեսման մեթոդ, որում ֆիզիկական նախագծի առանձնահատկությունների, հոսանքի բաշխման և ջերմային պայմանների հաշվի առնման շնորհիվ սնման ցանցի բազմակի մոդելավորման առկա միջոցների համեմատությամբ հաշվարկման ժամանակը կրճատվել է 70 և ավելի անգամ՝ հարաբերական սխալի ընդամենը 2-3%-ով ավելացման հաշվին:

Ստեղծվել է ինտեգրալ սխեմաներում միջմիացումների զգայուն ծրագծման մոդելի ուսուցման մեթոդ, որում ծրագծման գործընթացում բարձր ռիսկային գոտիների հայտնաբերման և դրանցից խուսափելու շնորհիվ ստացվել է միջմիացումների փոխազդեցության աղմուկների 18%-ով նվազում, տեղակայման խախտումների 84%-ով փոքրացում և ժամանակային բնութագրերի 17%-ով բարելավում՝ 2,9%-ով մակերեսի և էներգասպառման 5,1%-ը չգերազանցող աճի հաշվին:

Մշակվել է կոնվոլյուցիոն նեյրոնային ցանցով ջերմային դաշտի բաշխման կանխատեսման եղանակ, որում հզորության բաշխման քարտեզներից ջերմաստիճանային բաշխումների ստացման միջոցով այն առկա միջոցներից աշխատում է տասնյակ անգամ արագ՝ ճշտության մեջ զիջելով ընդամենը մի քանի տոկոսով, ինչը հատկապես կարևոր է ինտեգրալ սխեմաների նախագծման վաղ փուլերում:

Ատենախոսությունում մշակված արհեստական բանականությամբ ինտեգրալ սխեմաների ֆիզիկական նախագծման կայունացման միջոցներն իրագործվել են AIPDR ծրագրային միջոցում, որը ներդրվել է «ՄԻՆՈՓՄԻՍ ԱՐՄԵՆԻԱ» ՓԲԸ-ում և թույլ է տվել նվազեցնել սնուցման ցանցի վատագույն դեպքերի լարման անկումը մինչև 33,3%-ով՝ ապահովելով ընդամենը 4,2% մակերեսի աճ, իսկ կանխատեսման միջին շեղումը կազմել է 3,8–5,4%: Առաջարկված մեթոդների իրագործումը AIPDR ծրագրային գործիքի միջոցով թույլ է տվել կրճատել նախագծման և վավերացման ժամանակը 2-3 անգամ, ինչպես նաև հասնել միջմիացումների փոխազդեցության աղմուկների 18%-ով նվազման և ժամանակային բնութագրերի 17%-ով բարելավման՝ մակերեսի 2,9%-ով և էներգասպառման 5,1%-ը չգերազանցող աճի հաշվին:

**DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED TOOLS FOR
PHYSICAL DESIGN RELIABILITY OF INTEGRATED CIRCUITS**

Modern integrated circuit (IC) design processes have reached a level of complexity where classical engineering approaches often fail to meet the required levels of accuracy and reliability. Continuous trends in technological scaling – reducing transistor sizes to 3 nm and supply voltages to 0.6 V – simultaneously lead to both high performance and the emergence of new types of physical limitations.

Over the past decade, the complexity of IC design has grown dramatically – from 1 billion transistors on a chip in 45 nm technology to 120 billion in 3 nm technology. Under these conditions, IC operation becomes more sensitive to various external and internal factors. For example, in 45 nm technology, crosstalk between interconnects caused signal distortion of only 3-4%, whereas in 3 nm technology the same phenomenon leads to timing errors of up to 20-25%. The voltage drop phenomenon, which in 90 nm technology very rarely caused circuit failure, has become one of the main threats to stability in 3 nm technology, accounting for 18-25% of failures.

In such a complex environment, stability assurance must be implemented already at the design stage. This is where artificial intelligence (AI) methods gain a key role, enabling learning from previous design results, predicting error probability, and performing automatic optimizations considering complex interrelated design parameters. Traditional approaches require 3-6 months of design and verification time, whereas AI-based methods can reduce this time to 1-2 months while improving stability indicators by 10-20%.

The introduction of AI at the physical design stage of ICs forms new generation approaches that can significantly improve circuit stability while simultaneously reducing design and verification time. The dissertation is dedicated to solving current problems of increasing stability at the physical design stage of integrated circuits using artificial intelligence.

Approaches to stabilization of IC physical design tools using artificial intelligence have been proposed, the application of which made it possible to significantly improve the operational stability of created integrated circuits.

A method for predicting and optimizing voltage drops in IC power distribution networks using artificial intelligence has been developed, in which, due to the graph representation of the power grid, its stability analysis has been accelerated up to 785 times compared to industrial tools, with an increase in average relative error not exceeding 1.1%, keeping it within acceptable limits.

A method for predicting the impact of aging and electromigration in integrated circuits using machine learning has been proposed, in which, through consideration of physical design features, current distribution, and thermal conditions, computation

time has been reduced by 70 times and more compared to existing multiple power grid simulation tools, with an increase in relative error of only 2-3%.

A method for training a crosstalk-sensitive routing model in integrated circuits has been created, in which, through detection and avoidance of high-risk zones during the routing process, an 18% reduction in crosstalk noise, an 84% decrease in placement violations, and a 17% improvement in timing characteristics were achieved, at the cost of a 2.9% increase in area and power consumption not exceeding 5.1%.

A method for predicting thermal field distribution using convolutional neural networks has been developed, in which, through obtaining temperature distributions from power distribution maps, it operates tens of times faster than existing tools, conceding only a few percent in accuracy, which is especially important in the early stages of integrated circuit design.

The AI-based IC physical design stabilization tools developed in the dissertation have been implemented in the AIPDR software tool, which has been deployed at "SYNOPSYS ARMENIA" CJSC and made it possible to reduce worst-case voltage drop in the power grid by up to 33.3% while ensuring only a 4.2% area increase, with average prediction deviation of 3.8-5.4%. Implementation of the proposed methods using the AIPDR software tool enabled reduction of design and verification time by 2-3 times, as well as achieving an 18% reduction in crosstalk noise and a 17% improvement in timing characteristics, at the cost of a 2.9% area increase and power consumption not exceeding 5.1%.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Zeynal' or similar, with a stylized flourish at the end.