

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Պետրոսյան Պետրոս Սասունիկի

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐՈՒՄ ԻՆՔՆԱՍԱՔԱՑՄԱՆ ՀԵՏԵՎԱՆՔՆԵՐԻ
ՄԵՂՄԱՑՄԱՆ ԱՐԶԵՍԱԿԱՆ ԲԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՄԲ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ
ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

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

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Петросян Петрос Сасуникович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ДЛЯ СМЯГЧЕНИЯ
ПОСЛЕДСТВИЙ САМОАГРЕВА В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

АВТОРЕФЕРАТ

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

Ереван 2024

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում (ԵՊՀ):

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

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Սուրիկ Խաչիկի Խուրավերդյան
տ.գ.թ. Կարո Հրաչիկի Սաֆարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Հայ-Ռուսական (Սլավոնական)
Համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2024թ. հուլիսի 30-ին, ժամը 12⁰⁰-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 2024թ. հունիսի 29-ին

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



Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете (ЕГУ)

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

Официальные оппоненты: д.т.н. Сурик Хачикович Худавердян
к.т.н. Каро Грачикович Сафарян

Ведущая организация: Российско-армянский университет

Защита диссертации состоится 30-го июля 2024 г. в 12⁰⁰ 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 29-го июня 2024 г.

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



Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы развитие интегральных схем (ИС) происходит стремительными темпами, что обусловлено постоянным стремлением к более высокой производительности, уменьшению размеров и повышению энергоэффективности. Поскольку с развитием технологических процессов размеры транзисторов уменьшаются до нанометрового диапазона, полупроводниковая промышленность продолжает расширять возможности, делая ИС более компактными, высокопроизводительными и энергосберегающими. Постоянное совершенствование ИС позволило расширить области их применения, начиная от потребительской электроники и систем связи до автомобильного и промышленного оборудования. Однако уменьшение размеров и усложнение ИС также приводят к важным вызовам, особенно в плане надежности.

Наряду продолжающимся уменьшением размеров ИС действует закон Мура, согласно которому количество транзисторов удваивается примерно каждые 18 месяцев. По мере увеличения количества транзисторов их размеры уменьшаются, достигая значений менее 10 нм. Современные технологические процессы, такие как 5 нм и 3 нм, позволяют разместить в одной схеме миллиарды транзисторов. Увеличение количества транзисторов приводит к увеличению функциональности схемы. Например, новейшие процессоры ведущих производителей могут содержать более 50 миллиардов транзисторов.

Однако уменьшение размеров ИС приводит к большему энергопотреблению на меньшей площади и, следовательно, к нагреву, а именно-самонагреву. Самонагрев происходит в результате того, что схема потребляет электрическую энергию в процессе работы, часть которой преобразуется в тепло. Если теплопроводность всей площади схемы невысока и невозможно обеспечить быструю теплоотдачу, температура может значительно повыситься, создавая "горячие точки". Последние могут снизить производительность схемы и даже повредить её со временем.

Самонагрев происходит в основном из-за эффекта Джоуля-Ленца, обусловленного электрическим током. В современных высокопроизводительных ИС удельное энергопотребление может быть очень высоким, иногда превышая значение 100 Вт/см². Повышение температуры из-за самонагрева схемы может вызвать ряд нежелательных последствий, среди которых:

- снижение производительности: из-за высокой температуры работа ячеек схемы может замедлиться, что приводит к снижению производительности;
- увеличение токов утечки: высокая температура может увеличить токи утечки транзисторов, что приводит к общему увеличению энергопотребления;
- более быстрое старение: высокая температура может ускорить процесс старения схемы, что приводит к более ранним отказам.

Для решения указанных проблем различными научными группами и ведущими компаниями по проектированию ИС разрабатывались некоторые подходы, позволяющие минимизировать и смягчить последствия самонагрева. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, из-за которых они не удовлетворяют современным требованиям. Поэтому требуются новые подходы для смягчения последствий самонагрева.

Диссертационная работа посвящена разработке средств для ИС с использованием алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ), которые позволят рассчитать изменение температуры, вызванное самонагревом, и смягчить его последствия, изменяя размеры элементов и увеличивая теплопроводность.

Объект исследования. Объектом исследования выступает явление самонагрева в ИС, выявление и смягчение его последствий, а также применение алгоритмов ИИ.

Цель работы. Прогнозирование повышения температуры элементов из-за самонагрева в ИС и смягчение возникающих последствий на этапах схемотехнического и физического проектирования.

Методы исследования. В ходе проведения исследований были изучены современные подходы к тепловому моделированию и оценке последствий самонагрева, варианты их смягчения, методы создания и применения моделей ИИ, а также некоторые языки скриптования для разработки программного обеспечения.

Научная новизна:

- Предложены методы обнаружения и смягчения последствий самонагрева, которые позволяют предсказывать повышение температуры транзисторов, оптимизировать параметры для ее снижения, а также размещать тепловые туннельные сквозные соединения (ТТСС) для улучшения теплообмена за счет увеличения площади поверхности.
- Разработан метод прогнозирования повышения температуры из-за самонагрева в ИС на основе алгоритмов машинного обучения (МО), который позволяет максимально быстро и с высокой точностью выполнять тепловое моделирование. Применение алгоритмов МО позволяет сократить время расчета температуры примерно в 6...7 раз при потере точности около 4,37%.
- Спроектирован метод оптимизации параметров транзисторов на основе алгоритмов МО, который позволяет снизить повышение температуры, обусловленное самонагревом, без потери производительности. Оптимизация параметров транзисторов для смягчения последствий самонагрева позволяет снизить максимальную температуру на 39,46%, среднюю температуру - на 6,23%, за счет увеличения площади примерно на 30,52%.
- Разработан метод быстрого размещения ТТСС, благодаря которому на основе алгоритмов ИИ, возможно быстро прогнозировать их размещение. Использование нейронной сети позволяет на основе одного результата теплового моделирования внедрить ТТСС, которые увеличивают теплопроводность и снижают максимальную температуру схемы примерно на 6,97%, за счет увеличения площади примерно на 1,51%.

Практическая ценность работы. Разработано программное средство (ПС) Thermal Analysis and Enhancement Tool, с помощью которого прогнозируется повышение температуры элементов ИС из-за самонагрева с точностью примерно 95,7% без дополнительных симуляций, оптимизировать параметры транзисторов, обеспечивая снижение максимальной температуры в среднем на 35,04%, средней температуры - на 5,23%, за счет увеличения площади примерно на 33,7%, а также на этапе физического проектирования размещать ТТСС, обеспечивая снижение

максимальной температуры в среднем на 5,97%, за счет увеличения площади примерно на 2,07% и общей длины межсоединений - на 5,26%.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- метод прогнозирования повышения температуры из-за самонагрева элементов в ИС на основе алгоритмов МО;
- метод смягчения последствий самонагрева с оптимизацией параметров транзисторов на основе алгоритмов МО;
- метод смягчения последствий самонагрева с использованием ТТСС на основе алгоритмов ИИ;
- программное средство для прогнозирования повышения температуры из-за самонагрева элементов и предложения по смягчению последствий.

Достоверность научных положений. Достоверность научных результатов подтверждена математическими обоснованиями, представленными в диссертации, и их сопоставлением с результатами практического моделирования.

Внедрение. Разработанный программный инструмент "IC Thermal Analysis and Enhancement Tool" был внедрён в ЗАО "ЕРЕВАНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СРЕДСТВ СВЯЗИ" и используется на этапах схемотехнического и физического проектирования для прогнозирования повышения температуры элементов схемы и смягчения связанных с этим последствий.

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

- Международном симпозиуме "2023 IEEE East-West Design & Test" (Батуми, Грузия, 2023);
- научных семинарах кафедры "Микроэлектронные схемы и системы" НПУА (Ереван, Армения, 2021 - 2024 гг.);
- научных семинарах ЗАО "Синописис Армения" (Ереван, Армения, 2021 - 2024 гг.).

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

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы из 106 наименований и 6 приложений. В первом приложении представлен акт внедрения диссертации, во втором — частичное описание создания и использования модели для прогнозирования увеличения температуры, в третьем — частичное описание создания и использования модели для оптимизации параметров транзисторов, в четвертом — частичное описание создания и использования модели для размещения ТТСС, в пятом — частичное описание разработанного программного инструмента "IC Thermal Analysis and Enhancement Tool", в шестом — списки использованных изображений, таблиц и сокращений. Объем диссертации составляет 118 страниц, а вместе с приложениями 145 страниц.

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 рассматриваются причины возникновения самонагрева в ИС, последствия и характерные параметры. Самонагрев в ИС представляет собой повышение температуры из-за энергопотребления:

$$T = T_o + PR_T. \quad (1)$$

Формула (1) показывает связь между рабочей температурой схемы и энергопотреблением-где, T_o температура окружающей среды, P - энергопотребление, а R_T - тепловое сопротивление. Основные причины энергопотребления в ИС – это переключения транзисторов и токи утечки.

С развитием технологического процесса размеры металл-оксид-полупроводниковых (МОП) транзисторов, используемых в ИС, продолжают уменьшаться, достигая нескольких нанометров. С уменьшением размеров транзисторов снижается их энергопотребление, но увеличивается их количество в ИС. Несмотря на снижение энергопотребления отдельных транзисторов, темпы увеличения их количества значительно выше, что приводит к росту общего энергопотребления и удельного энергопотребления на единицу площади.

В последние годы мощность в ИС достигает даже киловатт, а удельная мощность - десятков ватт на квадратный миллиметр. Такое высокое энергопотребление приводит к самонагреву ИС, в результате чего при температуре окружающей среды 25°C схема может нагреваться более чем на 100°C, превышая 125°C. Так как для ИС устанавливаются допустимые пределы рабочей температуры (табл. 1), их превышение может привести к отказу устройства.

Таблица 1

Допустимые значения рабочей температуры для ИС

Название класса	Верхний предел допустимой температуры, °C	Нижний предел допустимой температуры, °C
Коммерческий	0	70
Промышленный	-40	85
Военный	-55	125

Из-за самонагрева в схеме могут также возникнуть температурные различия, достигающие десятков градусов. На полупроводниковом кристалле могут появляться температурные градиенты и "горячие точки" (рис. 1). Даже при допустимых средних температурах схемы очень важно учитывать наличие "горячих точек", так как они могут привести к локальным сбоям.

Изменение температуры в ИС влияет на ряд характеристик, включая энергопотребление. Из-за изменения температуры динамическая составляющая

энергопотребления может увеличиться примерно на 5%, в то время как статическая составляющая, обусловленная токами утечки, может увеличиться даже в 100 раз.

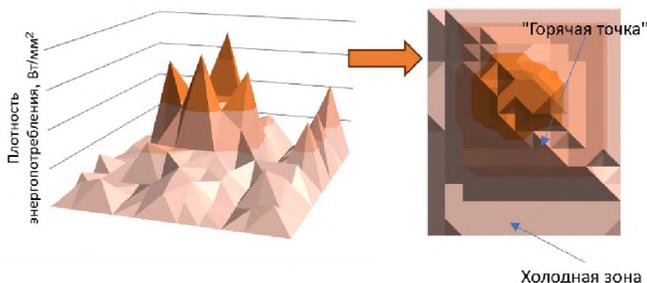


Рис. 1. Связь между плотностью энергопотребления и распределением тепла

Кроме увеличения энергопотребления, повышение температуры из-за самонагрева приводит также к снижению производительности. Производительность схемы снижается, так как повышение температуры вызывает к увеличению задержки сигнала. Например, повышение температуры может вызвать увеличение задержки сигнала примерно на 5%. От температуры также зависит электромиграция. Столкновения свободных носителей и атомов кристаллической решетки могут привести к структурным изменениям металлов. В результате может измениться сопротивление металла, возникнуть обрыв цепи или короткое замыкание.

В настоящее время самонагрев является одной из наиболее важных проблем при проектировании ИС. Поэтому множество специалистов и научных групп пытаются найти эффективные решения для исследования и смягчения последствий самонагрева. Современные методы позволяют исследовать и смягчить последствия самонагрева, однако каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки.

Тепловое моделирование возможно с использованием ряда программных инструментов, среди которых широко распространены RedHawk-SC, HyperLynx, TASPCEB и ASONIKA. В некоторых случаях использование этих инструментов нецелесообразно, так как они очень трудоемкие и приводят к увеличению сроков проектирования. Кроме того, при физическом проектировании ИС зачастую нас больше интересуют не столько точные значения температур, сколько их различия между элементами и наличие "горячих точек". Для исследования температурных различий элементов также существуют методы, такие как термоэлектрическое моделирование.

Метод термоэлектрического моделирования. Метод основан на аналогии тепловых и электрических явлений. Как известно, тепловой поток в твердых телах, обусловленный теплопроводностью, определяется законом Фурье (2), а электрический ток, обусловленный электропроводностью, – законом Ома (3):

$$P = \frac{\Delta T}{R_T}, \quad (2)$$

$$I = \frac{\Delta U}{R_3}, \quad (3)$$

Где P – мощность; I – сила тока; R_T и R_3 – соответственно тепловое и электрическое сопротивления; ΔT – изменение температуры, а ΔU – напряжение. Основываясь на аналогии между формулами (2) и (3), осуществляется моделирование величин (табл. 2).

Таблица 2

Соответствие электрических и тепловых параметров

Электрические параметры			Тепловые параметры		
Название	Единица измерения	Символ	Название	Единица измерения	Символ
Сила тока	А	I	Мощность	Вт	P
Напряжение	В	U	Температура	К	T
Электрическое сопротивление	Ом	R_3	Тепловое сопротивление	К/Вт	R_T

Если на кристалле ИС имеется N элементов, то изменение температуры i -го элемента, обусловленное теплопроводностью, определяется следующим образом:

$$T_i = T_0 + \sum_{k=1}^N R_{ki} P_k \quad (4)$$

где T_i – температура элемента; T_0 – температура окружающей среды; R_{ki} – тепловое сопротивление между k -ым и i -ым элементами; P_k – мощность.

Рассматривая логические ячейки как отдельные тепловые элементы, можно применить этот метод для них и построить тепловую карту всей схемы (рис. 2).

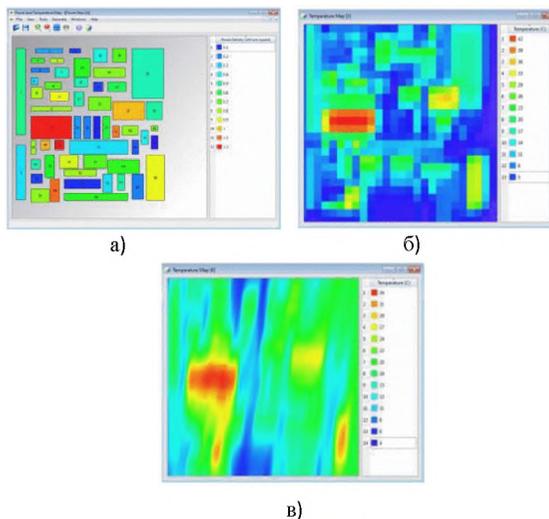


Рис. 2. Распределение ячеек ИС и их энергопотребление (а), графические изображения тепловых карт с шагом 20 мкм (б) и 3 мкм (в)

Преимущество метода заключается в его быстродействии и простоте, а недостаток — в большом количестве сделанных приближений.

Метод теплового моделирования с прямым внедрением. Средства теплового моделирования также могут применяться на этапе схмотехнического проектирования. Методы предлагают варианты расчета изменения температуры в транзисторе. Для транзистора с тепловой емкостью C_T и тепловым сопротивлением R_T при энергопотреблении P_T изменение температуры ΔT определяется следующим образом:

$$\frac{d(C_T \cdot \Delta T)}{dt} + \frac{\Delta T}{R_T} = P_T. \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) и расчета изменения температуры рассматривается аналогия с уравнением элементарной RC-цепи. Дифференциальное уравнение (5) для изменения времени $h = t_{i+1} - t_i$ задается следующим образом:

$$\left(\frac{C_T}{h} + \frac{1}{R_T}\right) * \Delta T_i = I_i[\Delta T_i] * V_i + \frac{C_T}{h} * \Delta T_{i-1}, \quad (6)$$

где I_i , ΔT_i , V_i — соответственно сила тока, изменение температуры и напряжение в момент времени i . В SPICE решение уравнения (6) выполняется итеративным методом Ньютона-Рафсона, так как ΔT находится и в правой, и в левой частях уравнения

$$\left(\frac{C_T}{h} + \frac{1}{R_T}\right) * \Delta T_i^{n+1} = I_i^n[\Delta T_i^n] * V_i^n + \frac{C_T}{h} * \Delta T_{i-1}. \quad (7)$$

Для уменьшения ошибки предложен другой метод, который позволяет ускорить тепловое моделирование без потери точности. Поскольку единственной неизвестной в уравнении (7) является ΔT_i^{n+1} , предлагается включить ее прямой расчет в моделирование (рис. 3). Недостаток метода заключается в его трудоемкости, так как выполняются итерации.

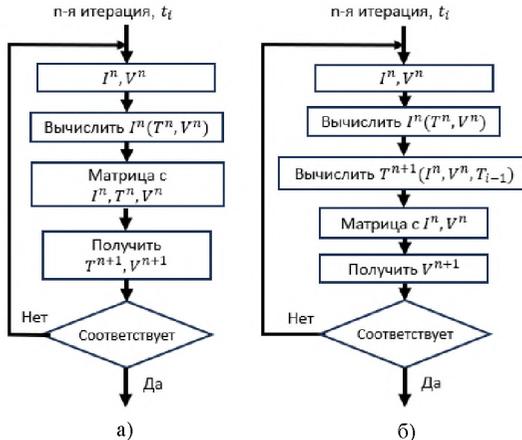


Рис. 3. Блок-схемы теплового моделирования с использованием подсхемы (а) и прямого внедрения (б)

Метод внедрения ТТСС. Проводя измерения изменения температуры и оценку влияния, может возникнуть необходимость применения методов для смягчения последствий самонагрева. Для обеспечения охлаждения в ИС используются ТТСС. ТТСС применяются в 3D ИС и обеспечивают высокую теплопроводность (рис. 4). В

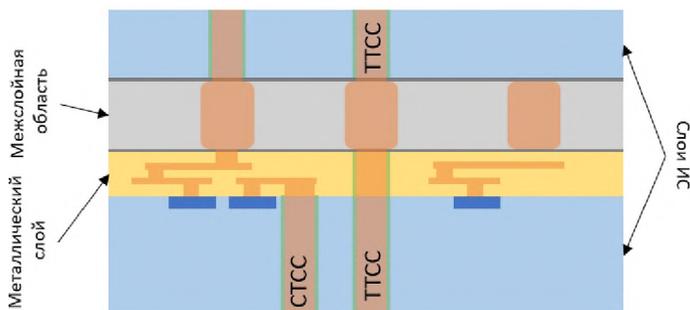


Рис. 4. Структура ТТСС

отличие от сигнальных туннельных сквозных соединений (СТСС), ТТСС не передают информацию, а обеспечивают только теплообмен. Применение ТТСС в различных частях ИС, особенно вблизи "горячих точек", может снизить максимальную температуру схемы.

Для эффективного использования ТТСС необходимо обеспечить баланс между увеличением длины межсоединений и снижением температуры. Чем больше будет внедрено ТТСС, тем лучшее охлаждение можно будет обеспечить, но при этом увеличатся суммарная длина межсоединений и область ИС. Например, использование итеративного алгоритма равномерного распределения ТТСС, покрывающего 3% площади ИС, приводит к снижению максимальной температуры на 17% (рис. 5).

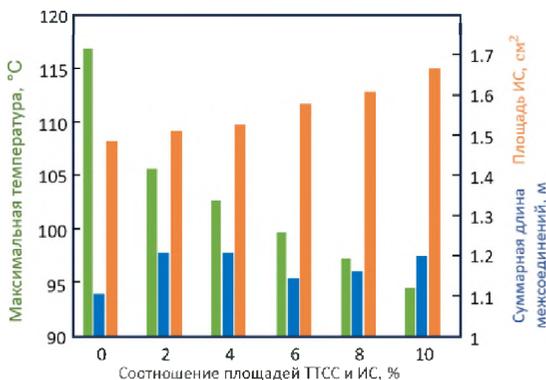


Рис. 5. Связь между площадью покрытия ТТСС и максимальной температурой

Во второй главе представлены разработанные методы и даются решения проблем, описанных в первой главе.

Метод прогнозирования изменения температуры, вызванного самонагревом. Для более быстрого теплового моделирования на этапе схемотехнического проектирования предлагается использовать алгоритмы ИИ для прогнозирования температуры.

В результате использования итераций при начальной температуре T_0 конечное значение температуры T определяется через энергопотребление, тепловое сопротивление и теплоемкость. Используя результаты измерения, можно построить модель для прогнозирования температуры T при следующих входных данных (рис. 6).

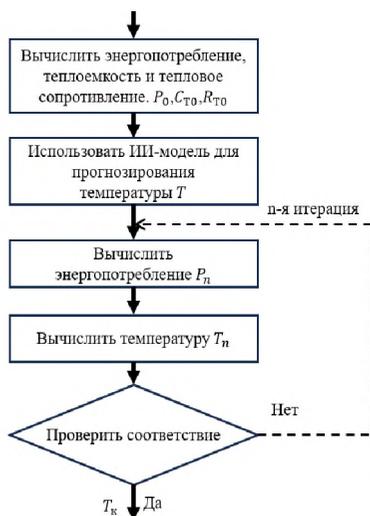


Рис. 6. Предлагаемая блок-схема теплового моделирования

Для обучения модели использовалась база данных, состоящая из значений T_0 , P_0 , R_{T0} , C_{T0} и T . База данных, построенная для работы, содержит более 10 000 элементов.

Для получения точных прогнозов были рассмотрены 4 типа моделей и выбрана лучшая модель. Рассмотренные модели:

1. Линейная регрессия.
2. Дерево решений.
3. Случайный лес.
4. Градиентный бустинг.

Для обучения модели использовалось 80% данных. Оставшиеся 20% применялись для оценки точности прогноза модели. С этой целью использовалась среднеквадратичная ошибка (СКО) (табл. 3).

Наименьшая ошибка среди рассмотренных моделей была получена для модели типа "градиентный бустинг" (рис. 7), которая и была использована для дальнейших прогнозов.

Таблица 3

Значения СКО для различных типов моделей

Название модели	Линейная регрессия	Дерево решений	Случайный лес	Градиентный бустинг
СКО	76,61	1,4736	2,1857	1,2577

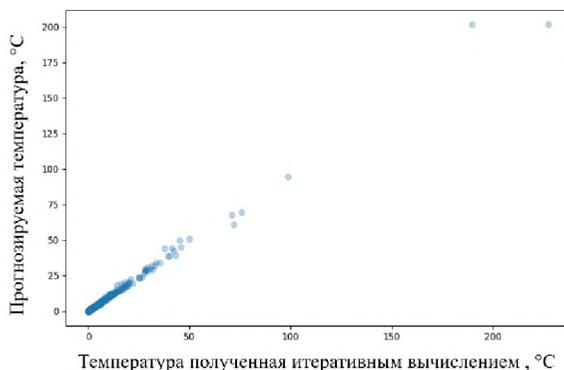


Рис. 7. Соотношение прогнозируемых и реальных температур для модели типа "градиентный бустинг"

Таким образом, прогнозирование температуры позволяет предсказать температуру с точностью до 95,63%, выполняя одну итерацию и, следовательно, ускоряя тепловое моделирование в 6...7 раз.

Метод смягчения последствий самонагрева путем оптимизации параметров транзисторов. В результате теплового моделирования для транзисторов с высокой температурой возникает необходимость применения методов с целью смягчения последствий самонагрева. В работе предлагается использовать алгоритмы МО для быстрой и оптимальной настройки параметров.

Так как тепловое сопротивление и теплоемкость зависят от количества затворов и каналов транзистора, а также от расстояния между ними, изменение этих параметров приводит к увеличению или уменьшению температуры при тех же входных сигналах. Изменение параметров может также привести к увеличению или уменьшению производительности и энергопотребления транзистора. Для оценки производительности транзистора рассматривается среднее значение основного показателя, влияющего на него - $I_{\text{сток-исток}}^{\text{актив}}$:

$$C_T, R_T, P, I_{\text{сток-исток}}^{\text{актив}} + \text{параметры транзисторов.} \quad (8)$$

Предлагается следующая последовательность шагов для оптимизации параметров (рис. 8):

- выполнить тепловое моделирование на схематехническом проекте;
- проверить повышение температуры на элементах и собрать данные;

- выполнить оптимизацию параметров для транзисторов с высокой температурой с помощью МО-модели.

В качестве величин для оптимизации выбраны те параметры транзистора, которые могут повлиять на тепловые коэффициенты и энергопотребление. Для использованных в работе транзисторов такими параметрами являются:

- n_3 - количество затворов;
- n_k - количество каналов;
- f_k - расстояние между каналами;
- L_3 - длина затвора.

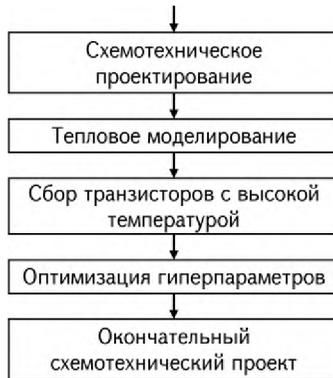


Рис. 8. Предлагаемая блок-схема метода оптимизации гиперпараметров

Для обучения модели была собрана база данных, содержащая информацию о более чем 10 000 элементах. На основе этой базы данных построена модель для оптимизации гиперпараметров.

Для оптимизации был использован метод "случайного леса", так как при этом не наблюдается снижение производительности. Вторичным эффектом изменения параметров является увеличение площади. Основным результатом прогнозирования включал увеличение количества каналов и затворов, увеличение длины затвора и расстояния между каналами. Для приближенных оценки площади используется следующая формула:

$$S = w * h = (n_k * h_k) * (n_3 * (f_k + L_3)). \quad (9)$$

Модель на входе принимает параметры транзистора и допустимые диапазоны их изменения (табл. 4), значения ограничений по силе тока, температуры элемента и окружающей среды (рис. 9). Поскольку для уменьшения роста температуры в основном увеличиваются размеры транзисторов, также задается допустимая максимальная температура, чтобы избежать неэффективного увеличения площади. В зависимости от входных данных выполняется прогнозирование для оптимизации параметров (табл. 5).

Таким образом, оптимизация параметров транзисторов для смягчения последствий самонагрева позволяет снизить максимальную температуру на 39,46% и среднюю температуру - на 6,23% за счет увеличения площади примерно на 30,52%.

Таблица 4

Диапазоны допустимых значений параметров транзистора

Название параметра, единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение
L_3 , мкм	0.014	0.3
n_3	1	30
n_k	1	30
f_k , нм	45	55



Рис. 9. Входные и выходные данные для прогнозирования параметров с помощью МО-модели

Таблица 5

Пример предлагаемого изменения параметров транзисторов

L_3 , мкм		n_3		n_k		f_k , нм	
начальный	предлагаемый	начальный	предлагаемый	начальный	предлагаемый	начальный	предлагаемый
0.03	0.08	1	5	3	3	50	52
0.03	0.08	1	8	12	12	50	52
0.03	0.05	1	1	5	9	50	52
0.014	0.03	1	1	1	23	50	52
0.014	0.016	1	3	1	2	50	52

Метод смягчения последствий самонагрева с использованием ТТСС и с применением алгоритмов ИИ. В некоторых случаях, когда невозможно снизить рост температуры, возникает необходимость применять методы для повышения теплообмена ИС и, следовательно, улучшения охлаждения. Увеличение теплообмена улучшает "тепловой поток" и снижает высокие локальные значения температуры.

В основном для увеличения теплообмена внедряются ТТСС, которые увеличивают площадь ИС и общую длину межсоединений. Оптимальное использование ТТСС позволяет снизить максимальную температуру с минимальными изменениями площади ИС. Для получения более быстрого решения

по сравнению с существующими методами предлагается использовать алгоритмы ИИ для размещения ТТСС.

Для смягчения последствий самонагрева путем размещения ТТСС предлагается следующая блок-схема метода внедрения ТТСС (рис. 10):

- сбор данных по ячейкам ИС;
- тепловое моделирование;
- проверка соответствия максимально допустимой температуре;
- прогнозирование размещения ТТСС;
- внедрение ТТСС.

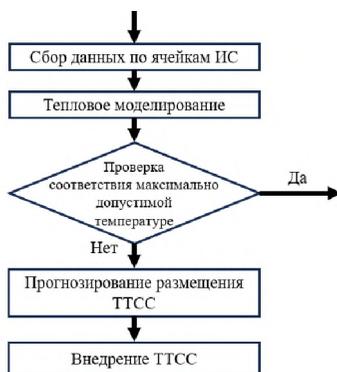


Рис. 10. Предлагаемая блок-схема метода внедрения ТТСС

Для выполнения теплового моделирования выбран метод термоэлектрического моделирования. На основе данных ячеек проводится моделирование и строится тепловая карта, которая сохраняется в виде матрицы для дальнейшего использования. Основываясь на тепловой карте, используется ИИ-модель для прогнозирования размещения ТТСС. Модель, опираясь на входные тепловые карты и результаты обучения, генерирует предложение по размещению ТТСС. На выходе получается список ТТСС с указанием их координат и диаметров.

Для построения модели использовалась база данных, содержащая:

- информацию о ячейках;
- начальную тепловую карту;
- информацию о ТТСС;
- конечную тепловую карту.

Для учета наличия ТТСС в процессе термоэлектрического моделирования добавлено их влияние на теплопроводность. В (4) вместо теплового сопротивления используется эффективное сопротивление, которое определяется следующим образом:

$$R_{\text{эфф}} = \left(\frac{1}{R_T} + \sum_{i=1}^M \frac{1}{R_{\text{ТТСС},i}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где M – количество ТТСС; $R_{\text{ТТСС}}$ – тепловое сопротивление ТТСС.

Поскольку модель работает с большими данными, в частности с тепловыми картами, для ее создания использована концепция пакетной нейронной сети.

Построение модели включает определение функции потерь, алгоритмов оптимизации и метрик, используемых для обучения модели. С помощью полученной модели выполняется прогнозирование размещения ТТСС на основе входных данных схемы. Для прогнозирования требуется только информация о ячейках схемы.

В отличие от других методов размещения ТТСС, предложенный в данной работе метод дает решение, при котором увеличение площади схемы приблизительно на 7,514% позволяет существенно сэкономить время на моделирование и решение уравнений (табл. 6). Моделирование и решение уравнений могут занимать несколько дней, что значительно замедляет процесс проектирования. В случае итеративного метода выполняется 9 моделирований, в то время как в предложенном методе - только 1.

Таблица 6

Изменения в схеме, вызванные размещением ТТСС

Метод размещения	Максимальная температура, °С	Увеличение площади, мкм ²	Увеличение площади, %	Увеличение длины межсоединений, мм	Увеличение длины межсоединений, %	Выполненные итерации
Без размещения ТТСС	129	-	-	-	-	-
С предложенным	120	71,18	1,517	0,1739	4,675	1
итеративным методом	120	65,84	1,403	0,1666	4,478	9

Таким образом, предложенный метод смягчения последствий самонагрева путем размещения ТТСС с применением алгоритмов ИИ позволяет снизить максимальную температуру схемы примерно на 6,97% за счет увеличения площади примерно на 1,51%.

В третьей главе представлено разработанное программно-инструментальное средство IC Thermal Analysis and Enhancement Tool (**ИТАЕТ**), которое позволяет быстрее и без ошибок, связанных с человеческим фактором, применять методы, представленные в предыдущей главе. ПС также упрощает работу с файлами, используемыми в процессе проектирования.

ПС ITAET состоит из трех основных окон. Первое окно предназначено для выполнения теплового моделирования (рис. 11 а). Окно состоит из двух частей. Первая часть предназначена для сбора данных, необходимых для прогнозирования, а вторая — для прогнозирования температур. Второе окно предназначено для оптимизации параметров (рис. 11 б). Как и первое окно, оно состоит из двух частей: для сбора необходимых данных и оптимизации параметров транзисторов. Третье окно также состоит из двух частей (рис. 11 в). Первая часть предназначена для выполнения теплового моделирования и получения тепловой карты. Полученную тепловую карту можно использовать во второй части окна для прогнозирования размещения ТТСС.

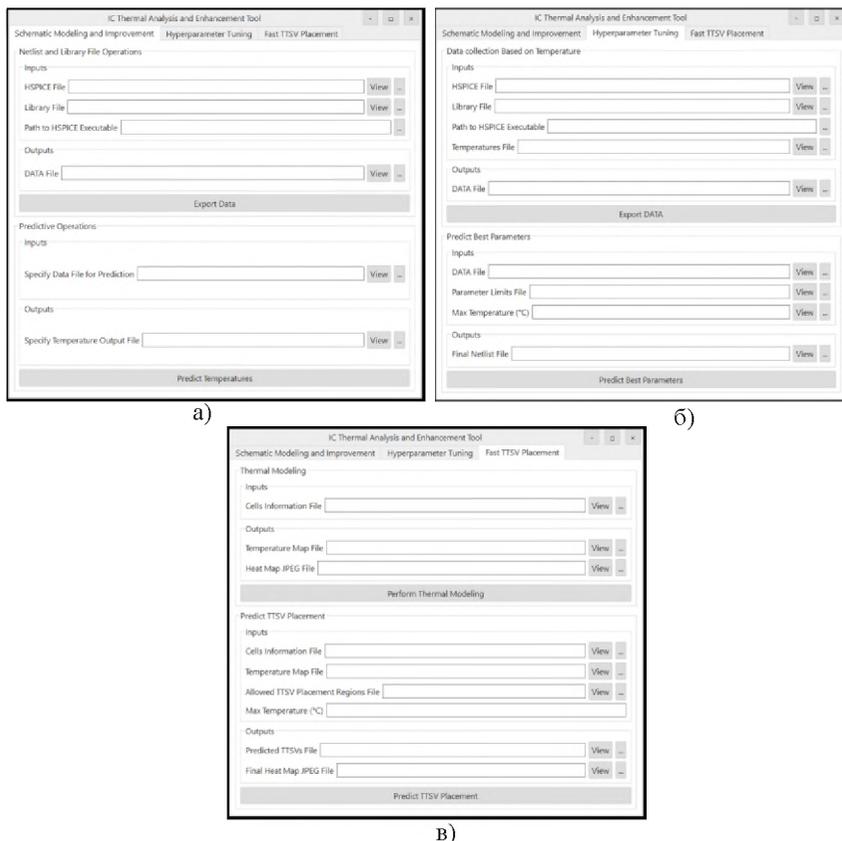


Рис. 11. Три основных окна программного обеспечения ITAET

Для проверки и обоснования эффективности разработанного ПС были проведены исследования на различных схемотехнических и физических проектах. Для проверки эффективности прогнозирования изменения температуры были

рассмотрены схемы, работающие на разных частотах, и проведено тепловое моделирование для всех элементов. Из результатов видно, что прогнозирование температур с помощью ПС ПТАЕТ в среднем с точностью до 95,74% соответствует реальным значениям, полученным в результате теплового моделирования итеративным методом (рис. 12).



Рис. 12. Сравнение реальных и прогнозируемых температур

Для проверки эффективности смягчения последствий самонагрева путем оптимизации параметров транзисторов были рассмотрены схемы и влияние метода на них. Были исследованы угловые рабочие режимы схем. Из полученных результатов видно, что при использовании ПС ПТАЕТ для оптимизации параметров транзисторов максимальная температура снижается в среднем на 35,04%, средняя температура - на 5,23% за счет увеличения площади примерно на 33,7% (рис. 13).



Рис. 13. Средние значения изменений показателей в результате оптимизации параметров транзисторов в различных схемах

На этапе физического проектирования для оценки эффективности предлагаемого метода размещения ТТСС для смягчения последствий самонагрева были рассмотрены схемы с разным количеством ячеек. Для схем было выполнено прогнозирование размещения ТТСС и оценено их влияние. Для сравнения также были оценены результаты метода итеративного размещения ТТСС. Из полученных

результатов видно, что при использовании ПС ПТАЕТ для прогнозирования размещения ТТСС максимальная температура снижается в среднем на 5,97% за счет увеличения площади примерно на 2,07% и общей длины межсоединений - на 5,26% (рис. 14).



Рис. 14. Средние значения изменений показателей в результате размещения ТТСС в различных схемах

Таким образом, использование разработанного программного средства позволяет:

- прогнозировать температуру элементов схемы с точностью до 95,7% без дополнительных симуляций;
- на этапе схмотехнического проектирования снизить максимальную температуру в среднем на 35,04% и среднюю температуру - на 5,23% за счет увеличения площади примерно на 33,7% путем оптимизации параметров транзисторов;
- на этапе физического проектирования снизить максимальную температуру в среднем на 5,97% за счет увеличения площади примерно на 2,07% и общей длины межсоединений - на 5,26% путем размещения ТТСС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложены методы обнаружения и смягчения последствий самонагрева, которые позволяют предсказывать повышение температуры транзисторов, оптимизировать параметры для ее снижения, а также размещать тепловые туннельные сквозные соединения (ТТСС) для улучшения теплообмена за счет увеличения площади поверхности [1, 2].
2. Разработан метод прогнозирования повышения температуры из-за самонагрева в ИС на основе алгоритмов машинного обучения (МО), который позволяет максимально быстро и с высокой точностью выполнять тепловое моделирование. Применение алгоритмов МО позволяет сократить время расчета температуры примерно в 6...7 раз при потере точности около 4,37% [3, 4, 5].
3. Спроектирован метод оптимизации параметров транзисторов на основе алгоритмов МО, который позволяет снизить повышение температуры, обусловленное самонагревом, без потери производительности. Оптимизация параметров транзисторов для смягчения последствий

самонагрева позволяет снизить максимальную температуру на 39,46%, среднюю температуру - на 6,23%, за счет увеличивая площадь примерно на 30,52% [2,3,4,5].

4. Разработан метод быстрого размещения ТТСС, благодаря которому на основе алгоритмов ИИ, возможно быстро прогнозировать их размещение. Использование нейронной сети позволяет на основе одного результата теплового моделирования внедрить ТТСС, которые увеличивают теплопроводность и снижают максимальную температуру схемы примерно на 6,97%, за счет увеличения площади примерно на 1,51% [1,3,4].
5. Спроектирован программный инструмент IC Thermal Analysis and Enhancement Tool, который предсказывает повышение температуры элементов вследствие самонагрева и предлагает решения для его смягчения. Этот инструмент представляет собой автоматизированную систему для теплового моделирования и снижения повышения температуры.
6. Использование программного инструмента позволяет предсказывать температуру элементов схемы с точностью до 95,7% без дополнительных симуляций, оптимизировать параметры транзисторов, обеспечивая снижение максимальной температуры в среднем на 35,04%, средней температуры - на 5,23% за счет увеличения площади примерно на 33,7%, а также снижать максимальную температуру в среднем на 5,97% за счет размещения тепловых туннельных сквозных соединений на этапе физического проектирования, за счет увеличения площади примерно на 2,07% и общей длины межсоединений - на 5,26%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Մխիթարյան Ա., Աբգարյան Գ., Ավագյան Ն., Պետրոսյան Պ.** 14 նմ տեխնոլոգիական գործընթացի համար ծերացման հասկոթումների հետազոտումն արագագործ համեմատիչ օրինակով // Վանաձորի պետական համալսարանի գիտական տեղեկագիր. - Երևան, 2021. - էջ. 21-29:
2. **Melikyan V., Abgaryan G. A., Petrosyan P., Avakyan N.** Low Power Analogue-Digital Converter Model // Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences). - 2021. - Vol. 56, no. 3. - P. 275-279, doi: 10.3103/s1068337221030178
3. **Պետրոսյան Պ.Ս.** Ինքնատաքացման երևույթի և հզորության ծախսի կախվածության հետազոտումը ցածր էներգասպառմամբ անալոգա-թվային կերպափոխիչի օրինակով // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխ. գիտ. սերիա. - 2022. - Հատոր 75, համար 3. - էջ 424-430:
4. **Melikyan V., Petrosyan P., Avagyan N., Abgaryan G.** Self-heating analysis method of integrated circuits // International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics (IRPhE-2022): Hybrid Conference. - Yerevan, Armenia, 2022. - P. 63-65, doi: 10.1049/icp.2022.2799
5. **Melikyan V., Petrosyan P., Avagyan N., Abgaryan G.** Smart Adjustment Of Transistor Parameters To Reduce Temperature Rise Due To Self-Heating Effect // 2023 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). - Batumi, Georgia, 2023. - P. 1-5, doi: 10.1109/EWDTS59469.2023.10297080

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Վերջին տասնամյակում ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) արտադրությունն ու օգտագործումը զգալիորեն աճել են՝ ստեղծելով նոր մարտահրավերներ և պահանջներ: ԻՄ-ների տարեկան արտադրությունը կրկնապատկվել է՝ հասնելով մի քանի հարյուր միլիարդի: Դրա արդյունքում ԻՄ-ների հուսալիության բարձր մակարդակի ապահովումը դառնում է կենսական անհրաժեշտություն, քանի որ այն ազդում է սարքի կյանքի տևողության, անխափան աշխատանքի և արագագործության վրա: ԻՄ-ների հուսալիության վրա ազդող հիմնական գործոններն են ինքնատաքացումը, ջերմային ազդեցությունը, ծերացումը, էլեկտրամիգրացիան, ռադիացիոն երեւոյթները, ազդանշանի ամբողջականությունը և տարրերի միջև փոխազդեցությունը: Ինքնատաքացումը տեղի է ունենում էներգասպառման հետևանքով, երբ ջերմաստիճանը բարձրանում է:

Տեխնոլոգիական գործընթացի զարգացմանը զուգընթաց, մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ տրանզիստորների չափսերը փոքրանում են՝ հասնելով մի քանի նանոմետրի: Չնայած տրանզիստորների էներգասպառման նվազմանը, դրանց քանակի աճը մեծացնում է սխեմայի ընդհանուր էներգասպառումը: ԻՄ-ների էներգասպառումը վերջին տարիներին հասնում է Կվտ-երի, իսկ տեսակարար հզորությունը՝ տասնյակ Վտ/մմ²: Բարձր էներգասպառման մակարդակը հանգեցնում է ԻՄ-ի ինքնատաքացման, այնպես որ, շրջակա միջավայրի 25°C ջերմաստիճանի դեպքում սխեման կարող է տաքանալ ավելի քան 100°C-ով: Ինքնատաքացման պատճառով սխեմայում կարող են առաջանալ ջերմաստիճանային տարբերություններ և «թեժ կետեր», որոնք կարող են բերել տեղային խափանումների:

Ներկայումս մի շարք մասնագետներ կամ գիտական խմբեր փորձում են գտել արդյունավետ լուծումներ ինքնատաքացման հետևանքների հետազոտման և մեղմացման համար: Արդի շատ միջոցներ հնարավորություն են տալիս ինքնատաքացման հետևանքների հետազոտման և մեղմացման համար, սակայն դրանցից յուրաքանչյուրն ունի իր առավելությունները և թերությունները: Տեխնոլոգիական գործընթացի զարգացման հետ միասին ավելի են մեծանում դրանց ճշտության և արագագործության պահանջները:

Ատենախոսությունը նվիրված է ինտեգրալ սխեմաների համար, արհեստական բանականության ալգորիթմների օգտագործմամբ, այնպիսի միջոցների մշակմանը, որոնք թույլ կտան հաշվարկել ինքնատաքացմամբ պայմանավորված ջերմաստիճանի փոփոխությունը և կատարել այդ պատճառով առաջացած հետևանքների մեղմացում՝ փոփոխելով տարրերի չափսերը և մեծացնելով ջերմահաղորդականությունը:

Առաջարկվել են ինքնատաքացման հետևանքների հայտնաբերման և մեղմացման եղանակներ, որոնք հնարավորություն են տալիս կանխագուշակել

տրանզիստորների ջերմաստիճանների աճը, կատարել պարամետրերի լավարկում՝ այն նվազեցնելու համար, և կատարել ջերմային միջմիացումների տեղակայում՝ մակերեսի մեծացման հաշվին ջերմափոխանակությունը լավացնելու համար:

Մշակվել է ինտեգրալ սխեմաներում ինքնատաքացման հետևանքով ջերմաստիճանի աճի կանխատեսման՝ մեքենայական ուսուցման ալգորիթմների վրա հիմնված եղանակ, որը հնարավորություն է տալիս՝ հնարավորինս արագ և բարձր ճշտությամբ կատարելու ջերմային մոդելավորում: Մեքենայական ուսուցման ալգորիթմների կիրառումը հնարավորություն է տալիս՝ նվազեցնելու ջերմաստիճանի հաշվարկի տևողությունը մոտավորապես 6...7 անգամ՝ 4,37% ճշտության կորստի հաշվին:

Նախագծվել է, տրանզիստորների պարամետրերի լավարկման՝ մեքենայական ուսուցման ալգորիթմների վրա հիմնված եղանակ, որը հնարավորություն է տալիս, առանց արագագործության կորստի, նվազեցնել ինքնատաքացմամբ պայմանավորված ջերմաստիճանի աճը: Տրանզիստորների պարամետրերի լավարկմամբ ինքնատաքացման հետևանքների մեղմացումը հնարավորություն է տալիս նվազեցնել առավելագույն ջերմաստիճանը 39,46%-ով, միջինը՝ 6,23%-ով, մեծացնելով մակերեսը մոտավորապես 30,52%-ով:

Մշակվել է ջերմային միջշերտային միջմիացումների արագ տեղակայման մեթոդ, որը, հիմնվելով արհեստական բանականության ալգորիթմների վրա, հնարավորություն է տալիս արագ կանխագուշակել դրանց տեղակայումը: Ներդրման ցանցի օգտագործումը հնարավորություն է տալիս, մեկ ջերմային մոդելավորման արդյունքների վրա հիմնվելով, ներդնել ջերմային միջշերտային միջմիացումներ, որոնք մեծացնում են ջերմահաղորդականությունը և հնարավորություն են տալիս նվազեցնելու սխեմայի առավելագույն ջերմաստիճանը մոտավորապես 6,97%-ով՝ մեծացնելով մակերեսը մոտավորապես 1,51%-ով:

Նախագծվել է ինքնատաքացման հետևանքով տարրերի ջերմաստիճանի աճի կանխատեսման և մեղմացման լուծումներ առաջարկող «IC Thermal Analysis and Enhancement Tool» ծրագրային միջոցը, որի օգտագործումը հնարավորություն է տալիս՝ կատարելու սխեմայի տարրերի ջերմաստիճանի կանխագուշակում մոտավորապես 95,7% ճշտությամբ՝ առանց հավելյալ նմանակումների, իրականացնելու տրանզիստորների պարամետրերի լավարկում՝ ապահովելով առավելագույն ջերմաստիճանի նվազեցում՝ միջին հաշվով 35,04%-ով, միջինը՝ 5,23%-ով, մակերեսի մոտավորապես 33,7%-ով մեծացման հաշվին, ինչպես նաև ֆիզիկական նախագծման փուլում ջերմային միջշերտային միջմիացումների տեղակայման միջոցով առավելագույն ջերմաստիճանի նվազեցում՝ միջին հաշվով 5,97%-ով՝ մակերեսի մոտավորապես 2,07% և միջմիացումների ընդհանուր երկարության 5,26% մեծացման հաշվին:

PETROS SASUNIK PETROSYAN

INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED METHODS FOR MITIGATING THE EFFECTS OF SELF-HEATING IN INTEGRATED CIRCUITS

SUMMARY

In the past decade, the production and use of integrated circuits (ICs) have increased significantly, creating new challenges and demands. The annual production of ICs has doubled, reaching several hundred billion units. As a result, ensuring a high level of IC reliability has become a vital necessity, as it affects the device's lifespan, faultless operation, and performance. The main factors affecting IC reliability include self-heating, thermal effects, aging, electromigration, radiation phenomena, signal integrity, and interactions between elements. Self-heating occurs due to power consumption, leading to temperature rise.

As the technological process advances, the size of metal-oxide-semiconductor transistors shrinks to a few nanometers. Despite the reduction in energy consumption per transistor, the increase in their number raises the overall power consumption of the circuit. In recent years, the power consumption of ICs has reached kilowatts, with specific power reaching tens of watts per square millimeter. High power consumption levels lead to self-heating of ICs, so that at an ambient temperature of 25°C, the circuit can heat up to over 100°C. Due to self-heating, thermal variations and "hot spots" can occur within the circuit, potentially leading to localized failures.

Currently, several specialists and scientific groups are attempting to find efficient solutions for studying and mitigating the effects of self-heating. Many modern methods allow for the investigation and mitigation of self-heating effects, each with its advantages and disadvantages. As technological processes advance, the requirements for their accuracy and performance increase.

This dissertation is dedicated to the development of methods for calculating the temperature change due to self-heating and mitigating its consequences in integrated circuits using artificial intelligence algorithms by altering the dimensions of the elements and increasing thermal conductivity.

Methods have been proposed for detecting and mitigating the effects of self-heating, enabling the prediction of temperature increases in transistors, optimizing parameters to reduce it, and placing thermal interconnections to improve heat exchange by increasing the surface area.

A method based on machine learning algorithms has been developed for predicting temperature increases due to self-heating in integrated circuits, allowing for rapid and accurate thermal modeling. The use of machine learning algorithms makes it possible

to reduce the temperature calculation time by approximately 6..7 times, with an accuracy loss of 4,37%.

A method for optimizing transistor parameters based on machine learning algorithms has been designed, enabling the reduction of temperature increases due to self-heating without losing performance. Optimizing transistor parameters to mitigate the effects of self-heating allows for a reduction in maximum temperature by 39,46%, on average by 6,23%, while increasing the surface area by approximately 30,52%.

A rapid placement method for thermal interlayer interconnections has been developed based on artificial intelligence algorithms, allowing for the quick prediction of their placement. Using a neural network allows for the insertion of thermal interlayer interconnections based on the results of a single thermal simulation, increasing thermal conductivity and reducing the circuit's maximum temperature by approximately 6,97%, while increasing the surface area by approximately 1,51%.

The "IC Thermal Analysis and Enhancement Tool" software has been designed to propose solutions for predicting and mitigating temperature increases in elements due to self-heating, enabling the prediction of the temperature of circuit elements with approximately 95.7% accuracy without additional simulations, optimizing transistor parameters to reduce maximum temperature by an average of 35,04%, on average by 5,23%, by increasing the surface area by approximately 33,7%, as well as reducing the maximum temperature during the physical design phase by placing thermal interlayer interconnections, reducing it by an average of 5,97%, with an increase in surface area of approximately 2,07% and total interconnection length by 5,26%.

