

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Դանիելյան Արմեն Միքայելի

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՄԱՌԻՑՄԱՆ ՑԱՆՑԻ ԷՆԵՐԳԱՍՊԱՈՍԱՆ

ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

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

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

Երևան 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Даниелян Армен Микаелович

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ СЕТИ
ПИТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

АВТОРЕФЕРАТ

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

Ереван 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում (ԵՊՀ):

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

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Սուրիկ Խաչիկի Խոտլավերդյան
տ.գ.թ. Մանվել Տիգրանի Գրիգորյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Հայ-ռուսական համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. սեպտեմբերի 19-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 2025թ. օգոստոսի 19-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. Манвел Тигранович Григорян

Ведущая организация: Российско-армянский университет

Защита диссертации состоится 19-го сентября 2025 г. в 14⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 046 — "Радиотехники и электроники", действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 19-го августа 2025 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 046 к.т.н.



Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы развитие производственного процесса интегральных схем (ИС) позволило достичь более высокой степени интеграции. Длина канала современных транзисторов достигает 2 нм и меньших значений. Сегодня количество транзисторов в ИС превышает несколько сотен миллиардов, а быстродействие может достигать десятков ГГц.

Согласно закону масштабирования Деннарда, уменьшение геометрических параметров комплементарного металл-оксид-полупроводникового (КМОП) транзистора, включая длину затвора и канала, толщину оксидного слоя затвора и другие размеры, осуществляется с одинаковым коэффициентом. Согласно прогнозам Деннарда, при уменьшении геометрических размеров в k раз снижается пороговое напряжение и становится возможным снизить значение напряжения питания в k раз, сохраняя неизменность действующих электрических полей транзистора.

Однако эта закономерность действовала до 90 нм технологического процесса. Основным ограничивающим фактором является непрерывное уменьшение толщины оксида затвора, что приводит к значительному увеличению тока утечки. Современный оксидный слой затвора достиг толщины в несколько атомных слоев, из-за чего влияние квантовых явлений стало существенным. Одновременно наличие высокого электрического поля затвор-подложка повышает вероятность пробоя оксида. С целью решения этой проблемы, для сохранения оксида одновременно тонким и достаточно прочным, началось внедрение новых материалов и структур транзисторов. Таким образом, уменьшение толщины оксида в k раз стало практически неосуществимым.

Таким образом, масштабирование размеров транзистора позволяет использовать более низкие напряжения питания. Уменьшение толщины оксидного слоя затвора снижает емкость затвора, что влияет на быстродействие транзистора. Одновременно сокращение толщины оксидного слоя приводит к росту токов утечки, что негативно влияет на номинальное значение напряжения питания.

Для решения этой задачи как отдельные исследователи и различные научные группы, так и ряд ведущих компаний по проектированию ИС разработали некоторые подходы, позволяющие реализовать снижение энергопотребления сети питания. Однако каждый из подходов имеет определенный недостаток, поэтому не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к схеме вследствие ее развития, или временным требованиям проектирования, тестирования и производства схемы. Для решения этой проблемы требуются новые подходы.

Диссертация посвящена укреплению сети питания в ИС, увеличению ее помехоустойчивости, разработке методов и принципов, которые позволят смягчить общее энергопотребление и падение напряжения в целевых участках.

Объект исследования. Методы снижения энергопотребления сети питания и повышения их помехоустойчивости, а также алгоритмы и модели искусственного интеллекта.

Цель работы. Разработка и исследование подходов проектирования, удовлетворяющих современным требованиям снижения энергопотребления сети питания в интегральных схемах.

Методы исследования. В диссертации использованы современные подходы и методы проектирования сети питания и повышения ее помехоустойчивости, способы получения моделей искусственного интеллекта и формы их применения.

Научная новизна:

- Предложены подходы для укрепления сети питания и подавления шумов в них, применяемые на различных этапах физического проектирования, которые сокращают время процесса проектирования и общее энергопотребление интегральной схемы за счет незначительного увеличения площади и временных параметров.
- Создан метод укрепления сети питания, который применен в тех участках проекта, где наблюдались высокие падения напряжения. Метод имеет ряд механизмов управления добавлением дополнительных металлических фрагментов. В результате применения предлагаемого метода улучшилось значение наихудшего падения напряжения на 43,5%. Площадь проекта сохранила свое первоначальное значение. Метод также оказал положительное влияние на динамическое энергопотребление – получено улучшение на 4,45%. Вышеуказанные улучшения произошли за счет ухудшения временных параметров – 71,4% (5нс) и статического энергопотребления – 2,48%.
- Разработан метод, основанный на дереве решений машинного обучения, который способствовал повышению эффективности маршрута размещения инструмента физического проектирования. В результате обеспечено снижение падения напряжения на 24,5%. Значения динамических и статических параметров энергопотребления соответственно снизились на 15,4 и 5,4%. Указанный процесс произошел за счет увеличения площади интегральной схемы на 7,7%. На 8,2% также ухудшился наихудший временной параметр.
- Предложен метод прогнозирования элементов с высоким энергопотреблением, основанный на алгоритмах машинного обучения. Затем, посредством развязывающих емкостей выполнено окружение предсказанных элементов. В результате улучшилось падение напряжения на 46%. Динамическая составляющая энергопотребления снизилась на 4,3%. Наихудший временной параметр улучшился на 7,6%. Указанный процесс произошел за счет увеличения площади на 3%. Также ухудшилось статическое энергопотребление на 7,2%, однако тем не менее общее энергопотребление снизилось на 3,8%.

Практическая ценность работы. Предложено программное средство снижения энергопотребления сети питания, которое позволяет с вводом необходимых входных данных реализовать применение методов и способов, представленных в диссертации. Разработана графическая среда OptiPDN, где отдельными подпрограммами реализуются предложенные методы, в каждом с возможностью соответствующих настроек. Результаты, полученные при проектировании с помощью программного средства, совпадают с точностью до 5% с результатами проектирования интегральных схем, выполненными проектировщиком, при существенном сокращении времени, затрачиваемого на сам процесс проектирования и смежные процессы. Предложенное программное средство

внедрено в ООО «Сиско Интернетворкинг» и практически применяется с целью снижения энергопотребления сети питания.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- метод укрепления участков с высоким падением напряжения в цепи питания интегральной схемы;
- способ оптимизации размещения в ИС с целью снижения энергопотребления, основанный на машинном обучении;
- метод прогнозирования логических элементов с высоким энергопотреблением и их окружения с развязывающими емкостями конденсаторами;
- предлагаемый программный инструмент для снижения энергопотребления цепи питания в интегральных схемах и повышения ее помехоустойчивости;

Достоверность научных положений Научные результаты подтверждены сопоставлением математических обоснований и экспериментальных результатов практических проектов, представленных в диссертации.

Внедрение. Программное средство OptiPDN внедрено в ООО «Сиско Интернетворкинг» и практически применяется в процессе физического проектирования ИС с целью проектирования надежных сетей питания и снижения общего энергопотребления ИС.

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

- 20-й Международной конференции «East-West Design & Test Symposium (EWDTs)» (Ереван, Армения, 2024г.);
- научных семинарах кафедры «Микроэлектронные схемы и системы» НПУА (Ереван, Армения, 2022-2025гг.);
- научных семинарах ЗАО «СИНОПСИС АРМЕНИЯ» (Ереван, Армения, 2022-2025гг.).

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

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 132 наименований и 4 приложений. В первом приложении представлен акт о внедрении диссертации, во втором – фрагмент, в третьем – фрагмент описания разработанного программного средства OptiPDN, а в четвертом – списки использованных рисунков, таблиц и сокращений. Объем диссертации составляет 124 страниц, а вместе с приложениями – 170 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 рассмотрены проблемы энергопотребления и падения напряжения в современных сетях питания интегральных схем. Проанализированы ограничения закона масштабирования Деннарда и влияние уменьшения размеров транзисторов на рост токов утечки. Исследованы существующие методы снижения энергопотребления и их недостатки.

Моделирование паразитных R, L и C компонентов в сетях питания. Сеть электропитания представляет собой многослойную металлическую сеть, которая соединяет выводы питания корпуса ИС с интегральной схемой, обеспечивая таким образом передачу напряжения внутренним элементам ИС.

В номинальном случае напряжение в сети однородно и соответствует уровню напряжения питания VDD или заземлению VSS. Однако уровень напряжения в сети питания может колебаться вследствие паразитных явлений, активности переключения схемы и взаимодействий. Изменения номинального значения напряжения в сети питания могут оказать серьезное влияние на работу ИС, приводя к снижению быстродействия схемы и возникновению сбоев.

Это особенно выражено в случае современных нанометровых процессов, где проводящие металлические провода стали существенно более узкими. Следовательно, необходим точный анализ и моделирование сетей питания для обеспечения надежной и высокопроизводительной конструкции. Для точного моделирования сетей питания ряд научных работ рассмотрели их паразитные явления и их влияние на поведение схем.

Основными паразитными явлениями являются: сопротивление, емкость и индуктивность. Как отмечено, паразитное сопротивление металлических проводов обусловлено их геометрическими размерами. Учитывая большой объем передачи напряжения питания, имеющийся в сети, падение напряжения, возникающее вследствие сопротивления металлов, становится значительным. Что считается одним из главных компонентов общего падения напряжения в сети питания. Индуктивные эффекты стали значительными в современных ИС, вызывая Ldi/dt шум. Паразитная индуктивность возникает как в проводниках, так и в соединениях между сетью питания и корпусом.

Рассмотрим RLC модель, изображенную на (рис. 1), где каждая ветвь представлена либо только сопротивлением - r-ветвь, либо последовательным соединением сопротивления и индуктивности - rl-ветвь. В сети существуют два типа узлов: внутренние и внешние. Внутренние узлы принадлежат rl-ветвям, а внешние узлы - концам металлических источников. Некоторые внешние узлы могут быть подключены к идеальным источникам напряжения. При проектировании с использованием технологии «Flip-Chip» идеальный источник часто представляется как C4 соединение, предполагая, что паразитные элементы C4 контактных шариков уже включены в модель.

В модели сети питания индуктивность представлена индуктивностью соединений сети или контактов, соединяющих сеть с внешними источниками напряжения. Кроме того, от каждого внешнего узла к заземлению имеется емкость, и некоторые узлы подключены к идеальным источникам тока, которые представляют потребляемый ток логических элементов, подключенных к соответствующему узлу. Для вывода системных уравнений применяется подход сетевого анализа, основанный на переменных состояния.

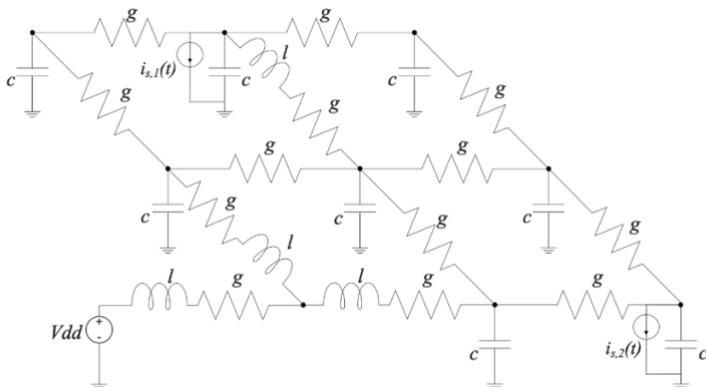


Рис. 1. RLC-модель сети питания

Можем записать дискретизированную по времени версию уравнений системы, учитывая, что при малом $\Delta t > 0$ производная функции $x(t)$ может быть аппроксимирована следующим образом:

$$x'(t) \approx \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Используя метод обратных конечных разностей, из (1.1) получаем дискретные варианты уравнений (1.2) и (1.3):

$$\left(G + \frac{C}{\Delta t}\right)v(t) - M_L i(t) = i_s(t) + \frac{C}{\Delta t}v(t - \Delta t) \quad (1.2)$$

$$M_L^T v(t) + \frac{L}{\Delta t} i(t) = + \frac{L}{\Delta t} i(t - \Delta t) \quad (1.3)$$

Переменными указанных уравнений являются напряжения узлов и токи индуктивных ветвей. Заметно, что $A = G + C/\Delta t$ также является симметричной, положительно определенной М-матрицей.

На изображенном ниже (рис. 2) представлена классическая модель сети питания:

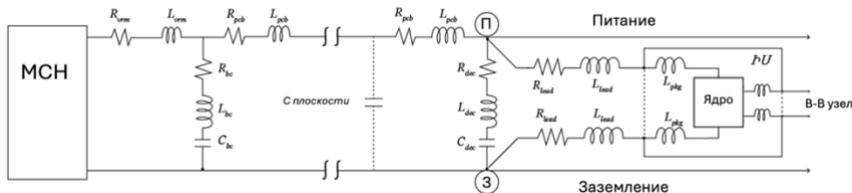


Рис. 2. Классическая модель сети питания

Таким образом, вышеупомянутые моделирования необходимы для разработки новых методов снижения энергопотребления сети питания. Это также позволяет оценить эффективность существующих методов и выявить недостатки.

Влияние шумов в сети питания и существующие методы их снижения. Шум, возникающий в сети питания, определяется как колебание напряжения в зависимости от времени, которое обусловлено динамическим изменением потребляемого тока в интегральной схеме и паразитными компонентами сети питания. Колебания приводят к локальным падениям напряжения, что может существенно нарушить операционную стабильность системы. Особенно в современных высокочастотных системах управление шумами в сети питания стало существенно важным, так как это может негативно повлиять на номинальное значение напряжения питания.

В процессе проектирования современных ИС широко применяются развязывающие емкости, которые размещаются с целью подавления колебаний напряжения в сети питания. Развязывающие емкости функционируют как локальные накопители заряда, которые в краткосрочные периоды компенсируют резкие изменения тока, снижая риск падения напряжения. В результате обеспечивается стабильность питания, повышая общую надежность схемы.

Критерий шумового напряжения определяется для оценки влияния шума на сеть питания. Данный критерий основан на интеграле падения напряжения (рис. 3), который превышает допустимый порог шума. Площадь заштрихованного участка соответствует интегралу данного узла z . Подход учитывает как величину нарушения, так и его продолжительность, предоставляя более полную оценку относительно шума.

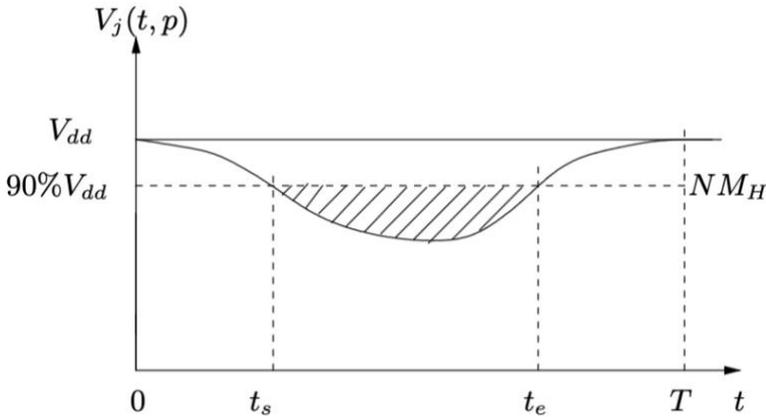


Рис. 3. Падения напряжения сети питания

В существующем методе применяется алгоритм, который оптимизирует процесс размещения развязывающих емкостей и выбор размеров, снижая шум сети питания за счет определенного увеличения площади. Процесс оптимизации формулируется как задача ограниченной нелинейной оптимизации, где основной

целью является снижение интеграла падения напряжения во всех узлах. В начальном состоянии развязывающие емкости распределены равномерно.

Экспериментальные результаты метода (рис. 4) показывают значительные улучшения представленных результатов падения напряжения до и после оптимизации. Количество элементов с нарушением падения напряжения значительно уменьшилось, а наихудшие значения падения напряжения и общие интегралы шума снизились.

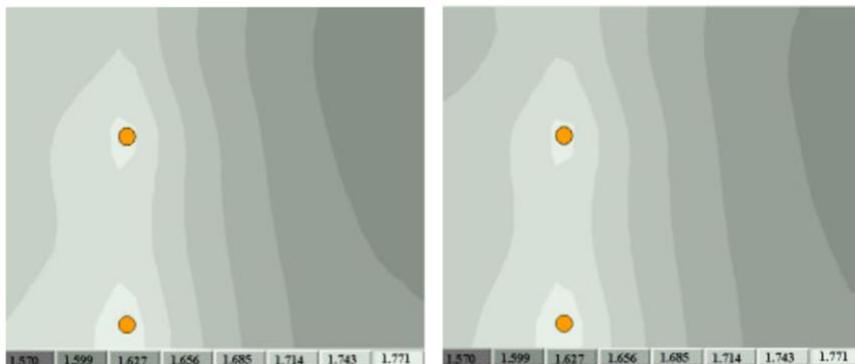


Рис. 4. Тепловые карты ИС до и после оптимизации

Таким образом, указанный метод эффективно использует доступное свободное пространство между стандартными элементами, затем оптимальным образом размещает развязывающие емкости и значительно снижает шум сети питания. Использование анализа чувствительности и кусочно-линейного сжатия обеспечивает быструю и масштабируемую оптимизацию, что совместимо с современными процессами проектирования. Однако эффективность метода в значительной степени зависит от наличия свободных пространств и в основном направлена на оптимизацию локальных элементов, а не полной системы. Более того, для повышения эффективности производится удаление развязывающих емкостей малого размера после оптимизации. Метод предполагает относительно фиксированное размещение стандартных элементов.

Внедрение металлических столбов питания с целью снижения падения напряжения. В современных 7 и более низких нанометровых процессах при проектировании ИС управление распределением напряжения питания стало фундаментальной проблемой. Параллельно с уменьшением размеров транзисторов плотность элементов на единицу площади постепенно возросла. Увеличение сопротивления металлических проводов наиболее заметно в нижних металлических слоях, что приводит к увеличению энергопотребления. Для уменьшения сопротивления в нижних металлических слоях широко применяется подход внедрения металлических «столбов» в сети питания как средство увеличения прочности сети питания. Идея внедрения столбов в сети питания включает создание коротких металлических соединений между соседними металлическими линиями VDD или VSS, в основном используя более низкие металлические слои, такие как

первый металлический слой (M1). Этот подход позволяет повысить эффективность распределения напряжения питания и снижает сопротивление между линиями питания (рис. 5).

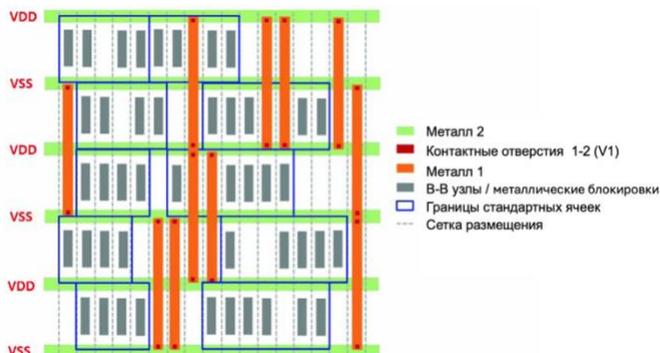


Рис. 5. Внедрение металлического столба в сети питания ИС

Метод применяет массив двумерного динамического программирования, где каждый элемент представляет максимальный накопленный вклад ранее размещенных ячеек. Алгоритм последовательно размещает ячейки, для каждой новой ячейки исследуя все допустимые позиции, учитывая преимущество нахождения в данной позиции.

Исходя из метода однорядной оптимизации, возможно также реализовать этот процесс, включая два соседних ряда. Подход позволяет изменения размещения, освобождая более длинные вертикальные свободные пространства для внедрения столбов питания. Двухрядное динамическое программирование продвигается по сетке размещения участком за участком, а не ячейка за ячейкой. В массиве динамического программирования хранится более сложное состояние, включающее данные о расстоянии последних размещенных ячеек в обоих рядах (рис. 6).

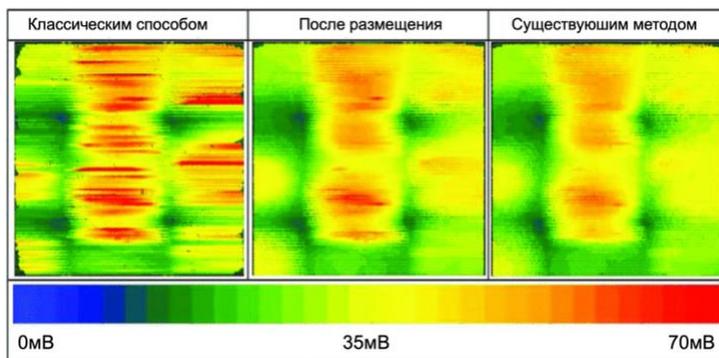


Рис. 6. Тепловая карта анализа динамического падения напряжения

Таким образом, метод оптимизации, основанный на динамическом программировании, эффективно снижает падение напряжения, одновременно сохраняя качество временных параметров. Он значительно увеличивает количество внедренных столбов без необходимости блокировок предварительного размещения. Метод может с трудом интегрироваться в стандартный проектный маршрут. Недостатком также является необходимость больших ресурсов и время реализации, особенно в случае двухрядного варианта. Кроме того, в некоторых случаях перемещения размещения могут немного ухудшить падение напряжения.

В предыдущих параграфах приведены современные требования, особенности и оценка существующих методов проектирования сети питания в ИС и обеспечения в них помехоустойчивости. Рассмотренные проблемы проектирования сети питания становятся более ключевыми, так как снижение напряжения питания оказывает существенное влияние на работу схем.

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

Метод укрепления сети питания в участках с высоким падением напряжения. Предлагаемый метод сосредоточен на укреплении сети питания после завершения физического проектирования. Сохраняя основную структуру сети питания и дополняя ее дополнительными соединениями питания и заземления в участках проекта с высоким энергопотреблением, метод позволяет снизить сопротивление сети питания, что в свою очередь оказывает положительное влияние на падение напряжения (рис. 7).

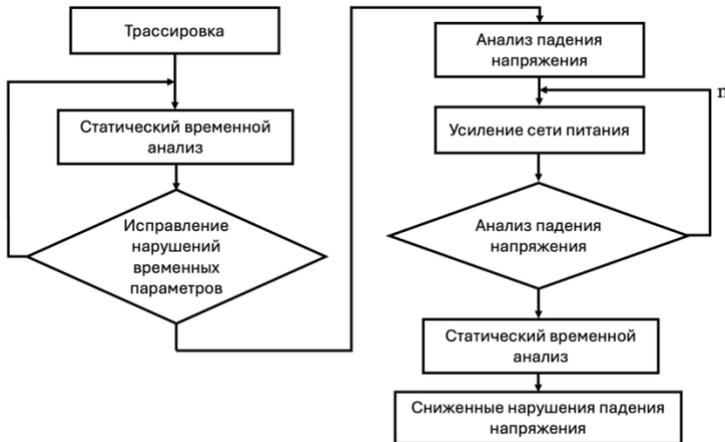


Рис. 7. Предлагаемый маршрут укрепления сети питания

Нарушения падения напряжения в основном зафиксированы вблизи элементов с высокой активностью переключения, более уязвимых к падению напряжения. Проецируя эти критические участки на проект, предлагаемый метод может эффективно смягчить падение напряжения и улучшить общее энергопотребление ИС (рис. 8).

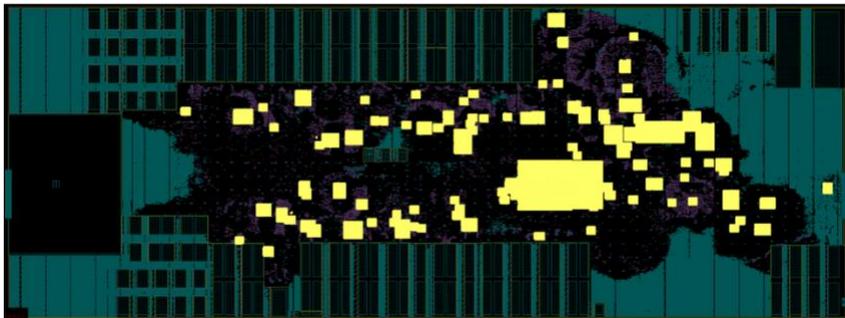


Рис. 8. Проекция критических областей на проект

Средство также имеет ряд опций, при применении которых можно воспользоваться еще несколькими возможностями. Среди опций - выбор участков статического или динамического падения напряжения, возможность регулирования плотности укрепления, выбор металлических слоев, опция применения метода в соседстве с макроячейками и др. Значения опций по умолчанию представлены (рис. 2.9). За счет изменения значений опций возможно получить необходимый уровень укрепления. После процесса исправления нарушений временных параметров в проекте наблюдалось определенное уплотнение трассировки. Затем был проведен анализ падения напряжения.

Процесс укрепления осуществляется на основе технологического файла. Целью является соблюдение правил при размещении возможных новых соединений. После размещения дополнительных линий питания в каждом металлическом слое выполняется проверка физических правил. В технологическом файле «*.tf» описываются правила относительно металлических проводников и межслойных переходов, такие как минимальные и максимальные значения расстояния между металлическими проводами, ширины, площади соответственно. Эти параметры применяются при применении метода с целью соблюдения физических правил проектирования.

Анализ падения напряжения был выполнен как динамическим, так и статическим методами. Наихудшие значения падения напряжения представлены (табл. 1) для последовательных и комбинационных элементов. Анализ падения напряжения был выполнен с использованием методов, зависящих от входного вектора (ВЗВ), и независимых методов (ВНМ).

Виды анализа:

- Динамический ВЗВ анализ на последовательных элементах
- Динамический ВЗВ анализ на комбинационных элементах
- Динамический ВНМ анализ на последовательных элементах
- Динамический ВНМ анализ на комбинационных элементах
- Статический анализ

Таблица 1

Результаты анализа падения напряжения до и после применения метода укрепления сети питания

Тип анализа Проект	V _{дин} (мВ)				V _{стат} (мВ)
	ВЗВ		ВНМ		
	Последовательные элементы	Комбинационные элементы	Последовательные элементы	Комбинационные элементы	
Классическим способом ИС1	52,2	72,5	38,5	55,9	13,8
Методом укрепления ИС1	25,8	31,6	21,8	26,7	12,5
Классическим способом ИС2	43,3	61,7	36,1	53,2	12,9
Методом укрепления ИС2	23,6	33,5	21,4	26,4	12

Результаты показывают, что при применении метода возможно существенно снизить падение напряжения в ряде участков проекта. Как видно, применение метода укрепления в соседстве с макроячейками также способствовало улучшению результатов макроячеек (рис. 9).

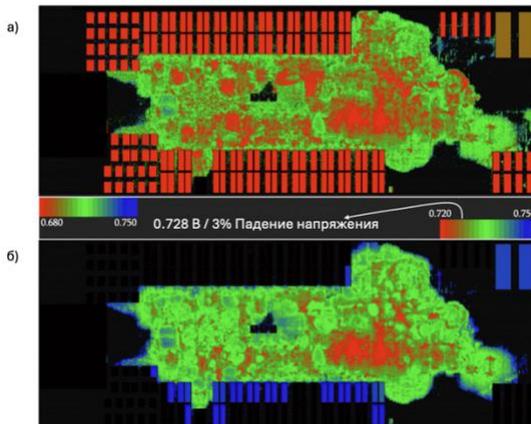


Рис. 9. Тепловые карты падения напряжения (а) до и (б) после применения метода

Был выполнен также динамический и статический анализ энергопотребления, а также статический временной анализ. В результате последнего анализа было получено выявление и оценка нарушений параметров времени установки входа последовательного элемента и времени удержания входа последовательного элемента (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение энергопотребления и временных параметров ИС предлагаемого метода и классическим способом

Параметр Проект	Динамическое энергопотребление (мкВт)	Статическое энергопотребление (мкВт)	Маржа времени установки входа (нс)	Маржа времени удержания входа (нс)
Классическим способом	925812,8	24673,6	-0,007	-0,005
Методом укрепления (60%)	906283,4	24426,6	-0,009	-0,006
Методом укрепления (80%)	893077,5	24798,7	-0,011	-0,005
Методом укрепления (95%)	884623,1	25033,1	-0,012	-0,008

Метод оптимизации размещения с целью снижения энергопотребления в ИС, основанный на машинном обучении. Одной из наиболее важных частей предлагаемого метода является систематизированный сбор данных, точная реализация которого обеспечивает последующую эффективность модели. Процесс сбора данных был реализован согласно детально разработанному плану, который включает регистрацию как проектных характеристик, так и соответствующих параметров и результатов.

Необходимые данные были собраны из примерно 1500 успешных проектов, которые охватывают широкий спектр проектных характеристик. Собранные данные были сохранены с расширением Comma-Separated Values (CSV), которое широко применяется для хранения данных благодаря простоте, гибкости и удобству обработки различными инструментами. Выбор CSV формата также обеспечивает удобную интеграцию с инструментами МО.

После чтения и подготовки данных было реализовано систематическое обучение дерева решений. Процесс обучения начался с глубокого анализа для определения эффективных параметров алгоритма, соответствующих данной задаче. Был использован класс «DecisionTreeClassifier» библиотеки «scikit-learn» который был специально настроен для реализации многоклассовой классификации.

В процессе обучения особое внимание было уделено оптимальному выбору глубины дерева, что чрезвычайно важно для обеспечения баланса между точностью модели и способностью к обобщению. Также была применена детальная настройка параметров «min_samples_split» и «min_samples_leaf» для избежания явления «overfitting» (рис. 10).

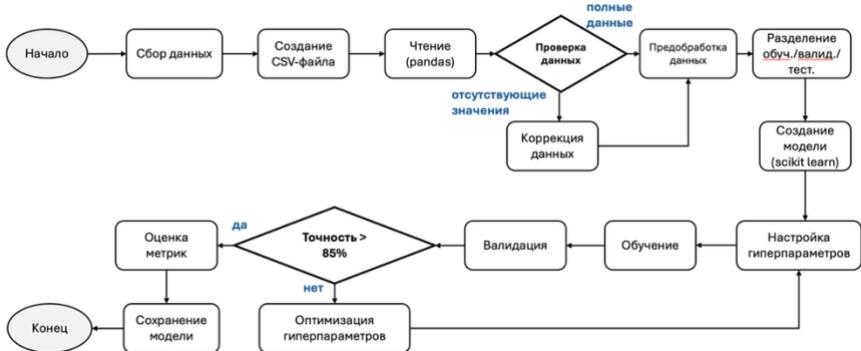


Рис. 10. Маршрут формирования модели МО

В процессе обучения модель анализирует каждый пример из базы данных и строит определенные правила, исходя из успешного опыта аналогичных проектов. Процесс начинается с выбора наиболее важных факторов - тех характеристик, которые больше всего влияют на конечный результат.

Полученные результаты показали высокую точность модели - 92% точность обучения и 87% точность валидации, что свидетельствует об эффективности модели (рис. 11).

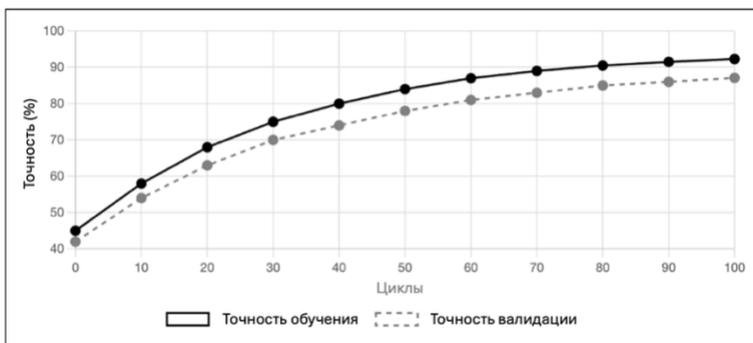


Рис. 11. Значения точности модели в зависимости от количества циклов

Анализы, проводимые после размещения, подробно показали, что метод, основанный на машинном обучении, с исключительным успехом предотвращает явления уплотнения ячеек, которыми трудно управлять традиционными методами. Во время первоначальных исследований во многих случаях были обнаружены участки с скоплениями ячеек высокой плотности, что вызывало значительные нарушения падения напряжения в сети питания. С целью эффективного избегания этой проблемы предлагаемый метод автоматически перераспределяет проблемные ячейки по поверхности ИС, создавая более равномерное распределение и значительно улучшая стабильность сети питания. Этот подход показал 25%

улучшение показателей падения напряжения по сравнению со стандартными методами.

Таким образом, была создана МО модель дерева решений, затем проведено ее обучение. В результате было получено улучшение маршрута размещения инструмента физического проектирования, что обеспечило снижение падения напряжения на 24,5%. Значения параметров динамического и статического энергопотребления соответственно снизились на 13,4% и 5,4%. Указанный процесс произошел за счет увеличения площади ИС на 7,7%. На 8,2% также ухудшился наихудший временной параметр.

Метод прогнозирования логических элементов с высоким энергопотреблением и их окружения развязывающими конденсаторами.

Разработанная для прогнозирования критических ячеек МО модель использует 10 основных входных параметров, которые комплексным образом характеризуют электрические, временные и физические свойства каждой ячейки. Выбор параметров был выполнен на основе физической природы проблем энергопотребления и падения напряжения.

Основные компоненты архитектуры включают 10 входных нейронов соответственно для каждого параметра, многослойную скрытую структуру с функциями активации «ReLU», слои «Batch Normalization» и «Dropout» для предотвращения переобучения, и один выходной нейрон с активацией «Sigmoid» для прогнозирования вероятности критичности (рис. 12).

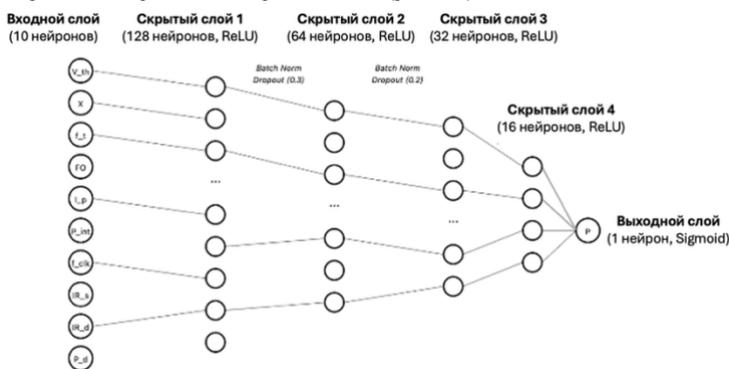


Рис. 12. Структура нейронной сети

Обучение модели было выполнено на основе 120 различных проектных примеров, из которых 96 были использованы для обучения, а 24 для тестирования.

Размещение отключающих ячеек вокруг критических ячеек выполняется по следующим принципам. В непосредственной близости от каждой критической ячейки, по всему периметру размещаются отключающие ячейки соответствующего размера. Если во время размещения в окрестности критической ячейки отсутствуют свободные участки, тем не менее процесс выполняется и отключающие возможности размещаются в данном районе. После размещения выполняется коррекция правил распределения отключающих возможностей. Затем фиксация их позиций. Если ячейки с высокой частотой переключения находятся вблизи критических ячеек,

отключающие ячейки размещаются между ними, создавая «изолирующий барьер» (рис. 13).

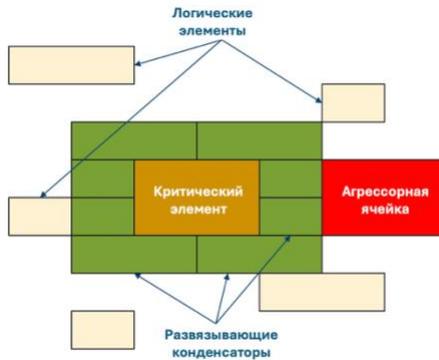


Рис. 13. Окружение критической ячейки с развязывающими конденсаторами

Таким образом, разработана основанная на нейронной сети модель МОУ, которая выполняет предсказание элементов с высоким энергопотреблением. Выполнено обучение и валидация модели, а также оценка эффективности. Посредством отключающих возможностей выполнено окружение предсказанных элементов. В результате имело место улучшение падения напряжения на 46%. Динамическая составляющая энергопотребления снизилась на 4,3%. Наихудший временной параметр улучшился на 7,6%. Указанный процесс имел место за счет увеличения площади ИС на 3%. Ухудшилось также статическое энергопотребление на 7,2%, однако тем не менее общее энергопотребление снизилось на 3,8%.

В третьей главе представлено разработанное программно-инструментальное средство «OptiPDN», которое позволяет с исключением ошибок, обусловленных человеческим фактором, выполнять реализацию предлагаемых методов снижения энергопотребления сети питания и анализ данных.

Основное окно программного средства начинается с подокна «PG Reinforcement» (рис. 14), где все входные данные должны быть определены в поле "Input Data".



Рис. 14. Окно ввода условий работы

Когда набор входных данных полностью определен, пользователь должен перейти в подокно «Implementation», где имеются 3 кнопки, которые являются: «Run FC», «Run PT» и «Run RHSC» (рис. 15).

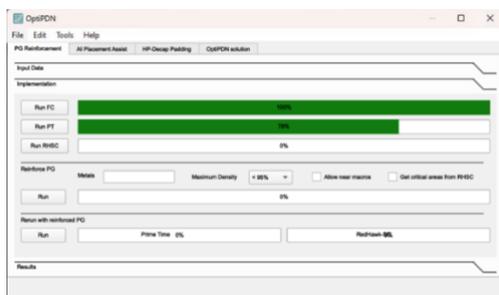


Рис. 15. Возможность просмотра полученных результатов

Кнопка «Run FC» выполняет логическое и физическое проектирование схемы в случае, когда во входных данных выбрано «From Scratch». В случае выбора «After ECO» кнопка «Run FC» деактивируется. Кнопка «Run PT» выполняет статический временной анализ схемы. Кнопка «Run RHSC» выполняет анализы статического и динамического падения напряжения. Индикатор выполнения указанных операций программный инструмент отображает в процентах.

Анализ результатов последовательностей вышеуказанных шагов выполняется в подразделе «Results». В подразделе «Results» пользователь может видеть полученные различные результаты (рис. 16).

Для оценки эффективности программного инструмента OptiPDN были сравнены приведенные во второй главе результаты с полученными программным средством. Сравнения выполнены для трех подпрограмм.

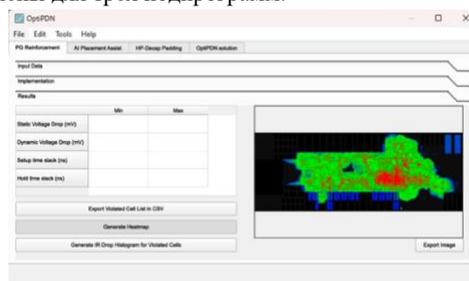


Рис. 16. Возможность просмотра полученных результатов

Таким образом, из приведенных результатов видно, что результаты ИС, спроектированных программным средством OptiPDN, сопоставимы с приведенными во второй главе. Также с применением предложенного программного средства значительно снижается время, используемое для проектирования, и возможные ошибки, обусловленные человеческим фактором (табл. 3).

Таблица 3

Полученные результаты подпрограммы *OptiPDN solution*

Проект \ Параметр	Динамическое энергопотребление (мкВт)	Статическое энергопотребление (мкВт)	Маржа времени установки входа (нс)	Маржа времени удержания входа (нс)	Площадь (мм ²)
Классическим способом	79365,0	4527,8	-0,101	-0,085	1,153
Методом укрепления ИС1	62439,1	4507,5	-0,095	-0,081	1,260
С применением программного средства ИС1	62487,3	4,511.2	0,0949	0,0811	1,261
Методом укрепления ИС2	73984,1	4929,8	-0.09	-0.075	1,208
С применением программного средства ИС2	73938,7	4924,4	-0,088	-0,0753	1,208

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Разработаны новые методы, которые благодаря усилению сети питания и подавлению ее шумов на различных этапах физического проектирования сокращают время процесса проектирования и общее энергопотребление интегральной схемы за счет незначительного увеличения площади и временных параметров.
2. Разработан метод снижения энергопотребления посредством усиления сети питания, который реализуется в участках проекта с высокими падениями напряжения благодаря добавлению металлических фрагментов и межслойных переходов. В результате применения предлагаемого метода произошло улучшение значения наихудшего падения напряжения на 43,5%. Применение метода не приводит к росту площади. В результате получено улучшение динамического энергопотребления на 4,45%. Вышеуказанные улучшения произошли за счет ухудшения временных параметров на 71,4% (5пс) и статического энергопотребления на 2,48%.
3. Предложен подход, основанный на дереве решений машинного обучения, который способствовал повышению эффективности маршрута размещения инструмента физического проектирования. В результате обеспечено снижение падения напряжения на 24,5%. Значения параметров динамического и статического энергопотребления снизились соответственно на 15,4% и 5,4%. Указанный процесс произошел за счет увеличения площади интегральной схемы на 7,7% и ухудшения запаса наихудших временных параметров на 8,2%.
4. Создана модель прогнозирования элементов с высоким энергопотреблением, основанная на алгоритмах машинного обучения, которая выполняет окружение прогнозируемых элементов благодаря

развязывающим емкостям. В результате произошло улучшение падения напряжения на 46%, а динамическая составляющая энергопотребления снизилась на 4,3%. Наихудший временной параметр улучшился на 7,6%. Указанный процесс произошел за счет увеличения площади на 3%. Ухудшилось также статическое энергопотребление на 7,2%, однако тем не менее общее энергопотребление снизилось на 3,8%.

5. Предложено программное средство для снижения энергопотребления сети питания, которое позволяет посредством ввода необходимых входных данных осуществлять применение методов и подходов, представленных в диссертации. Разработана графическая среда OptiPDN, где отдельными подпрограммами реализуются предлагаемые методы, в каждой с возможностями соответствующих настроек. Результаты, полученные при проектировании программным средством, совпадают с результатами проектирования интегральных схем, выполненного проектировщиком, с точностью до 5%, при существенном сокращении времени, затрачиваемого на само проектирование и сопутствующие процессы. Предложенное программное средство внедрено в ООО "Сиско Интернетворкинг" и практически применяется с целью снижения энергопотребления сети питания.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Ա.Ա. Ղազարյան, Ա.Մ. Գանիեյան** Խառը ազդանշանային ինտեգրալ սխեմաներում տեղաբաշխման օպտիմալացումը արհեստական բանականության կիրառմամբ // ՀԱՊՀ, Լրաբեր գիտական հոդվածների ժողովածու. -2025. - մաս. 1, - էջ 118-122:
2. **Danielyan A.** Mitigation of IR Drop Through Power Delivery Network (PDN) Reinforcement in Critical Zones // 2024 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). - Yerevan, Armenia, 2024. - P. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS63723.2024.10873690
3. **Վ.Շ. Մելիքյան, Ա.Ա. Գալստյան, Ա.Մ. Գանիեյան, Հ.Հ. Սահակյան, Վ.Ա. Սահակյան, Ռ.Մ. Սողոմոնյան** Մերենայական խոր ուսուցման մոդելի կիրառմամբ ինտեգրալ սխեմաների սինթրոազդանշանային ծառի ֆիզիկական նախագծման արդյունավետության բարձրացման եղանակ // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ-ի Տեղեկագիր. Տեխն. Գիտ. Սերիա. - 2024. - Հատ. 77, N 2. - էջ 179-189:
4. **O.H. Petrosyan, A.G. Manukyan, A.M. Danielyan, S.S. Khachatryan** Introduction Of A Customizable RTL And UVM Testbench Generator // Proceedings of NPUA: Information Technologies, Electronics, Radio Engineering - 2024 - № 2. - P. 86-96, doi:10.53297/18293336-2024.2-86.
5. **Туманян А.К., Манукян А.Г., Галстян А.А., Даниелян А.М.** Аппаратные акселераторы на основе систолических матриц // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. – 2020. – № 1. – С. 44-56.
6. **Մանուկյան Ա.Գ., Գալստյան Ա.Ա., Գանիեյան Ա.Մ.** Չուզահեռ բազմակարգ բազմապատկիչների պարամետրացված մոդելի մշակում // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ-ի Տեղեկագիր. Տեխն. Գիտ. Սերիա. - 2020. - Հատ. 73, N 4. - էջ 442-448:

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Վերջին տարիներին ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) արտադրական գործընթացի զարգացումը հնարավոր է դարձրել ստանալ ավելի բարձր ինտեգրացման աստիճան: Ժամանակակից տրանզիստորների հոսքուղու երկարությունը հասնում է մինչև 2նմ և ավելի ցածր արժեքների: Այսօր ԻՄ-երում տրանզիստորների քանակը գերազանցում է մի քանի հարյուր միլիարդը, իսկ արագագործությունը կարող է հասնել տասնյակ ԳՀց-երի :

Դեննարդի մասշտաբավորման օրենքի համաձայն, կոմպլեմենտար մետաղ օքսիդ կիսահաղորդիչ (ԿՄՕԿ) տրանզիստորի երկրաչափական պարամետրերի փոքրացումը, այդ թվում՝ փականի և հոսքուղու երկարությունը, փականի օքսիդի շերտի հաստությունը և այլ չափերը, իրականացվում է մինևույն գործակցով: Դեննարդի կանխատեսումների համաձայն՝ երկրաչափական չափերի k գործակցով փոքրացման դեպքում նվազում է շեմային լարումը և հնարավոր է դառնում k անգամ իջեցնել սնուցման լարման արժեքը՝ պահպանելով տրանզիստորի գործող էլեկտրական դաշտերի անփոփոխությունը:

Այդուհանդերձ, այս օրինաչափությունը գործել է մինչև 90նմ արտադրական գործընթացը: Հիմնական սահմանափակող գործոնը փականի օքսիդի հաստության շարունակական նվազեցումն է, ինչը հանգեցնում է արտահոսքի հոսանքի նշանակալի մեծացման: Ներկայիս փականի օքսիդի շերտը հասել է մի քանի ատոմական շերտի հաստության, ինչի պատճառով քվանտային երևույթների ազդեցությունը դարձել է զգալի: Միաժամանակ, փական-հարթակ բարձր էլեկտրական դաշտի առկայությունը բարձրացնում է օքսիդի խափանման հավանականությունը: Այս հիմնախնդիրը լուծելու նպատակով՝ օքսիդը միաժամանակ բարակ և բավականաչափ ամուր պահելու համար, սկսվել է նոր նյութերի և տրանզիստորի կառուցվածքների ներդրումը: Այսպիսով, k գործակցով օքսիդի հաստության փոքրացումը դարձել է գործնականորեն անիրագործելի:

Այսպիսով, տրանզիստորի չափերի մասշտաբավորումը հնարավորություն է տալիս օգտագործել ավելի ցածր սնուցման լարումներ: Փականի օքսիդի շերտի հաստության նվազեցումը փոքրացնում է փականի ունակությունը, ինչը ազդեցություն է ունենում տրանզիստորի արագագործության վրա: Միաժամանակ օքսիդի շերտի հաստության կրճատումը հանգեցնում է արտահոսքի հոսանքների աճի, ինչը բացասական ազդեցություն է ունենում սնուցման լարման նոմինալ արժեքի վրա:

Այս մարտահրավերի լուծման համար ինչպես անհատներ և տարբեր գիտական խմբեր, այնպես էլ ԻՄ-ի նախագծման մի շարք առաջատար ընկերություններ մշակել են որոշ մոտեցումներ, որոնցով հնարավոր է իրագործել սնուցման ցանցի էներգասպառման նվազեցում: Սակայն

մոտեցումներից յուրաքանչյուրն ունի որոշակի թերություն, ուստի չի բավարարում սխեմայի զարգացման հետևանքով դրան ներկայացվող պահանջները, կամ սխեմայի նախագծման, թեստավորման և արտադրման ժամանակային պահանջները: Այս հիմնահարցի լուծման համար պահանջվում են նոր մոտեցումներ:

Ատենախոսությունը նվիրված է ԻՄ-երում սնուցման ցանցի ամրապնդմանը, դրա աղմկակայունության մեծացմանը մեթոդների և սկզբունքների մշակմանը, որոնք թույլ կտան մեղմացնել ընդհանուր էներգասպառումը և լարման անկումը թիրախային տեղամասերում:

Առաջարկվել են սնուցման ցանցի ամրապնդման և դրանցում աղմուկների մեղմացման մոտեցումներ՝ կիրառված ֆիզիկական նախագծման տարբեր փուլերի ընթացքում, որոնք կրճատում են նախագծման գործընթացի ժամանակը և ինտեգրալ սխեմայի ընդհանուր էներգասպառումը, մակերեսի և ժամանակային պարամետրերի ոչ էական մեծացմամբ հաշվին:

Ստեղծվել է սնուցման ցանցի ամրացման մեթոդ, որը կիրառվել է նախագծի այն տեղամասերում որտեղ նկատվել են բարձր լարման անկումներ: Մեթոդը ունի լրացուցիչ մետաղական կտորների ավելացման կառավարման մի շարք մեխանիզմներ: Առաջարկվող մեթոդի կիրառման արդյունքում տեղի է ունեցել վատագույն լարման անկման արժեքի 43,5% բարելավում: Նախագծի մակերեսը պահպանել է իր նախնական արժեքը: Մեթոդը նաև դրական ազդեցություն է ունեցել դինամիկ էներգասպառման վրա՝ ստացվել է 4,45% բարելավում: Վերոնշյալ բարելավումները տեղի են ունեցել ժամանակային պարամետրերի՝ 71,4% (5պվ) և ստատիկ էներգասպառման՝ 2,48% վատթարացման հաշվին:

Մշակվել է մեքենայական ուսուցման որոշումների ծառի վրա հիմնված մեթոդ, որը նպաստել է ֆիզիկական նախագծման գործիքի տեղաբաշխման երթուղու արդյունավետության բարձրացման: Արդյունքում ապահովվել է լարման անկման 24,5% նվազեցում: էներգասպառման դինամիկ և ստատիկ պարամետրերի արժեքները համապատասխանաբար նվազել են 15,4 և 5,4 %-ներով: Նշված գործընթացը տեղի է ունեցել ինտեգրալ սխեմայի մակերեսի 7,7% մեծացման հաշվին: 8,2% վատթարացել է նաև վատագույն ժամանակային պարամետրը:

Առաջարկվել է բարձր էներգասպառում ունեցող տարրերի կանխատեսում իրականացնող մեթոդ, հիմնված մեքենայական ուսուցման ալգորիթմների վրա: Ապա, կապագերծող ունակությունների միջոցով կատարվել է կանխագուշակված տարրերի շրջապատում: Արդյունքում տեղի է ունեցել լարման անկման բարելավում 46%: էներգասպառման դինամիկ բաղադրիչը նվազել է 4,3%-ով: Ժամանակային վատագույն պարամետրը բարելավվել է 7,6%-ով: Նշված գործընթացը տեղի է ունեցել 3% մակերեսի մեծացման հաշվին: Վատթարացել է նաև ստատիկ էներգասպառումը 7,2%-ով, սակայն այնուամենայնիվ ընդհանուր էներգասպառումը նվազել է 3,8%-ով:

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION
OF POWER SUPPLY NETWORKS IN INTEGRATED CIRCUITS**

SUMMARY

In recent years, the development of integrated circuit (IC) manufacturing processes has made it possible to achieve higher degrees of integration. The gate length of modern transistors reaches down to 2nm and lower values. Today, the number of transistors in ICs exceeds several hundred billion, while operating speed can reach tens of GHz.

According to Dennard's scaling law, the reduction of geometric parameters of complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) transistors, including gate and channel length, gate oxide layer thickness and other dimensions, is implemented by the same factor. According to Dennard's predictions, when geometric dimensions are reduced by a factor of k , the threshold voltage decreases and it becomes possible to reduce the supply voltage value by k times while maintaining the constancy of the transistor's operating electric fields.

However, this regularity held until the 90nm manufacturing process. The main limiting factor is the continuous reduction of gate oxide thickness, which leads to significant increase in leakage current. The current gate oxide layer has reached the thickness of several atomic layers, due to which the influence of quantum phenomena has become significant. Simultaneously, the presence of high electric field at the gate-substrate interface increases the probability of oxide breakdown. To solve this problem - keeping the oxide simultaneously thin and sufficiently strong - the introduction of new materials and transistor structures has begun. Thus, reducing oxide thickness by a factor of k has become practically unrealizable.

Therefore, scaling transistor dimensions allows the use of lower supply voltages. Reducing the gate oxide layer thickness decreases gate capacitance, which affects transistor operating speed. Simultaneously, reducing oxide layer thickness leads to increased leakage currents, which has a negative impact on the nominal value of supply voltage.

To solve these challenges, both individuals and various scientific groups, as well as a number of leading IC design companies, have developed certain approaches that enable power supply network energy consumption reduction. However, each of these approaches has certain shortcomings, so it does not satisfy the requirements presented to the circuit as a result of circuit development, or the temporal requirements of circuit design, testing, and manufacturing. Solving this fundamental issue requires new approaches.

The dissertation is dedicated to power supply network reinforcement in ICs, increasing its noise immunity through the development of methods and principles that will allow mitigating overall energy consumption and voltage drop in target areas.

Power supply network reinforcement approaches and noise mitigation methods have been proposed, applied during different phases of physical design, which reduce design process time and integrated circuit overall energy consumption at the cost of non-essential increase in area and timing parameters.

A power supply network reinforcement method has been created, which has been applied in project areas where high voltage drops have been observed. The method has a number of control mechanisms for adding additional metal pieces. As a result of applying the proposed method, a 43.5% improvement in worst-case voltage drop value has occurred. The project area has maintained its initial value. The method also had a positive impact on dynamic energy consumption - a 4.45% improvement was achieved. The aforementioned improvements occurred at the cost of timing parameter deterioration by 71.4% (5ps) and static energy consumption by 2.48%.

A machine learning decision tree-based method has been developed, which contributed to improving the efficiency of the physical design tool's placement route. As a result, a 24.5% reduction in voltage drop was ensured. Dynamic and static energy consumption parameter values decreased by 15.4% and 5.4% respectively. This process occurred at the cost of a 7.7% increase in integrated circuit area. The worst timing parameter also deteriorated by 8.2%.

A method for predicting high energy consumption elements based on machine learning algorithms has been proposed. Then, through decoupling capacitances, the predicted elements were surrounded. As a result, voltage drop improvement of 46% occurred. The dynamic component of energy consumption decreased by 4.3%. The worst timing parameter improved by 7.6%. This process occurred at the cost of 3% area increase. Static energy consumption also increased by 7.2%, however, overall energy consumption still decreased by 3.8%.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Nurshayun' with a stylized flourish below it.