

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Վարդույան Արման Վահագնի

ԹՎԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ
ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

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

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Вардумян Арман Ваагнович

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

АВТОРЕФЕРАТ

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

Ереван 2024

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

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

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Արմինե Գևորգի Ավետիսյան
տ.գ.թ. Գոռ Արսենի Պետրոսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և
ավտոմատացման պրոբլեմների
ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2024թ. հունիսի 11-ին, ժամը 11⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Կառավարման և ավտոմատացման» 032 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ–ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2024թ. մայիսի 8-ին

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

Մանե Գագիկի Խաչատրյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА)

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

Официальные оппоненты: д.т.н. Армине Геворговна Аветисян
к.т.н. Гор Арсенович Петросян

Ведущая организация: Институт проблем информатики и
автоматизации НАН РА

Защита диссертации состоится 11-го июня 2024 г. в 11⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 032 – “Управления и автоматизации”, действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 8-го мая 2024 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 032, к.т.н.

Мане Гагиковна Хачатрян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время интегральные схемы (ИС) широко используются практически во всех сферах человеческой деятельности. В связи с таким беспрецедентным ростом спроса на различные ИС и их вовлечением в жизненно важные отрасли были ужесточены требования, предъявляемые к процессу их проектирования с точки зрения скорости, энергопотребления и занимаемой площади. Для удовлетворения этих требований было проведено масштабирование компонентов, благодаря чему стала возможной организация процессов производства транзисторов с длиной проточной части до 3 нм. Однако наряду с этим возросло и влияние вторичных факторов на выходные параметры ИС, что может привести к непредсказуемому поведению в различных условиях работы. Это обстоятельство в сочетании с огромным количеством одновременно проектируемых схем существенно усложняет весь производственный процесс.

Поскольку оптимизация выходных параметров ИС осуществляется за счет изменения физических размеров входящих в их состав компонентов, общий процесс можно математически сформулировать как однокритериальную или многокритериальную задачу оптимизации с размерностями в качестве входных и ограничениями в качестве выходных параметров. В такой постановке для автоматизированного решения задачи параметрической оптимизации ИС разработано множество подходов, основанных на построении моделей, заменяющих схему. Однако наибольшая точность достигается с помощью алгоритмов, основанных на моделировании, которые применяют подходы группового интеллекта (ГИ) и рассматривают проблему как “черный ящик”. Кроме того, были проведены эксперименты по замене программного средства (ПС) моделирования на алгоритмы машинного обучения (МО) для удаления наиболее времязатратного компонента из процесса. Несмотря на все это, существующие методы все еще имеют проблемы, связанные со скоростью сходимости, обнаружением глобального оптимума и затратами вычислительных ресурсов.

Диссертация посвящена решению задач, связанных с автоматизацией процесса параметрической оптимизации ИС, и разработке алгоритмов, которые позволят с большей эффективностью и меньшими затратами вычислительных ресурсов обнаруживать варианты схем, удовлетворяющих заданным требованиям.

Объект исследования. Методы повышения скорости сходимости при обнаружении глобального оптимума алгоритмов автоматизированной параметрической оптимизации ИС. Способы сокращения количества вызовов моделирующего ПС во время поиска.

Цель работы. Разработка методов и средств повышения эффективности поиска в глобальной и локальной областях алгоритмов автоматизированной параметрической оптимизации ИС, минимизации количества выполняемых моделирований.

Методы исследования. В ходе диссертации были использованы ряд современных оптимизационных алгоритмов (ОА), методы инициализации первичной популяции, подходы МО и искусственного интеллекта, а также соответствующие программные пакеты и инструменты.

Научная новизна:

- Предложены средства автоматизированной параметрической оптимизации ИС, которые, преобразуя заданную схему и ограничения в однокритериальную или многокритериальную задачу оптимизации, применяют стратегии ГИ ОА и МО для нахождения глобального минимума с наименьшим количеством моделирований.
- Разработан гибридный алгоритм, основанный на принципах ГИ, который для обеспечения разнообразия особей в популяции на этапе глобального поиска использует стратегии генетического алгоритма (ГА), в частности, сочетание методов отбора на основе рулетки, равномерного скрещивания и многоточечной мутации, а во время локального поиска использует четыре метода из ОА “ястребы Харриса” (ОАЯХ), выбор которых осуществляется через внутренние параметры. В результате решения проблемы нахождения минимума рассмотренных эталонных функций и параметрической оптимизации трёх ИС предложенный подход по эффективности превзошел остальные рассмотренные алгоритмы в среднем на 48,11%.
- Создан алгоритм инициализации первичной популяции, способствующий увеличению скорости сходимости ОА, осуществляющий пропорциональную выборку по всей длине доступной области поиска и не зависящий от случайных факторов и дополнительных вычислительных процессов, обеспечивающий воспроизводимость результатов. Предложенный метод в задачах минимизации рассмотренных эталонных функций и оптимизации трёх ИС, по сравнению с другими методами, обеспечивает в среднем на 36,97% более приемлемые результаты.
- Разработана система замены программного средства моделирования ИС на искусственную нейронную сеть (ИНС) во время оптимизации, в которой часть обучающих данных формируется с использованием вычислительного процесса на основе генеративно-состязательной сети (ГСС) и корреляционных коэффициентов Спирмена (ККС), что позволяет еще раз сократить количество необходимых симуляций без потери производительности системы. Предложенный подход при параметрической оптимизации рассмотренных трёх ИС позволил реализовать в среднем на 8,86% меньше вызовов программы моделирования.

Практическая ценность работы. Предложенные в диссертации алгоритмы и системы автоматизированной параметрической оптимизации ИС были реализованы в ПС “ICOptimizer”. Программный инструмент благодаря удобному интерфейсу, определению входных файлов, проверке данных, обнаружению и исправлению ошибок, гибким механизмам ввода данных, связанных с проектными ограничениями, алгоритмами, ИНС и рядом других параметров, позволило сократить процесс проектирования в 3...4 раза. Применение ПС с использованием механизмов ОА, их инициализацией, заменой на ИНС программы моделирующей схемы при поиске, а также дополнительных средств формирования обучающих данных позволило получить результаты, отличающиеся от эталонных методов в среднем на 4,02%.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- гибридный алгоритм, обеспечивающий более высокий охват области поиска при оптимизации;
- метод инициализации первичной популяции для повышения скорости сходимости алгоритмов оптимизации;
- метод сокращения количества симуляций ИС, выполняемых при параметрической оптимизации;
- программный инструмент “ICOptimizer”, способствующий процессу автоматизированной параметрической оптимизации ИС.

Достоверность научных положений. Достоверность научных результатов подтверждена программной реализацией представленных в диссертации алгоритмов, результатами экспериментов моделирования и параметрической оптимизации рассматриваемых ИС и математическими обоснованиями.

Внедрение. ПС “ICOptimizer” было внедрено в ЗАО “Синописис Армения” и используется с целью реализации автоматизированной параметрической оптимизации в рамках проектирования ИС, обеспечивая решение, удовлетворяющее поставленным требованиям.

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

- Международном симпозиуме “IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)” (Батуми, Грузия, 2019 г.);
- Международной конференции “International Conference on Frontiers of Communications, Information System and Data Science (CISDS)” (Гуанчжоу, Китай, 2022 г.);
- научном семинаре кафедры "Микроэлектронные схемы и системы" НПУА (Ереван, Армения, 2020 - 2023 гг.);
- научных семинарах ЗАО "Синописис Армения" (Ереван, Армения, 2020 - 2023 гг.);

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

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, основных выводов, списка литературы, включающего 111 наименований, и трёх приложений. В первом приложении представлен акт внедрения, во втором – отрывки из описаний методов и классов, реализованных в рамках ПС “ICOptimizer”, в третьем - списки использованных рисунков, таблиц и сокращений. Основной объём диссертации составляет 121 страницу, а вместе с приложениями - 132 страницы, включая 50 рисунков и 30 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлены основные ОА из семейства ГИ, используемые для оптимизации ИС, рассмотрено влияние инициализации первичной популяции на их скорость сходимости, а также изучена система, частично исключая моделирующую программу из процесса поиска. Изучены недостатки методов и необходимость их уменьшения или нейтрализации.

Процесс параметрической оптимизации ИС можно охарактеризовать как поиск значений размеров компонентов ИС, при которых результаты моделирования будут соответствовать техническому заданию (рис. 1).

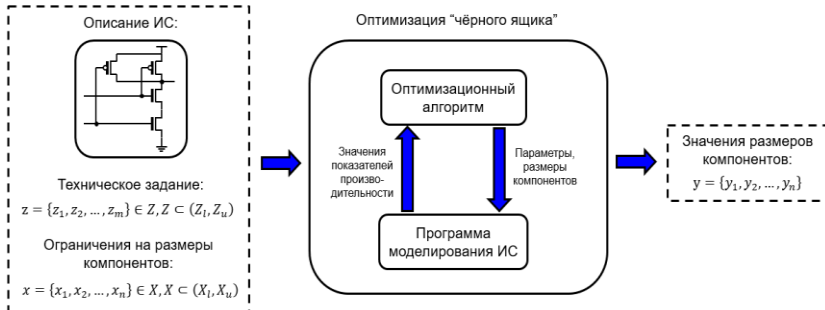


Рис. 1. Схема процесса параметрической оптимизации ИС

ОА, осуществляющие поиск на результатах моделирования ИС, являются самыми точными методами из ныне доступных. Среди таких подходов одним из наиболее популярных считается ГА, для которого до сих пор предлагаются модернизации конкретно для решения задачи параметрической оптимизации ИС. Один из таких ГА приведён на рис. 2, который выполняет процесс мутации кандидатов, опираясь на правила проектирования конкретной ИС и зависимости размеров компонентов от значений выходных параметров.



Рис. 2. Схема выполнения обновлённого ГА с управляемой мутацией

Метод был применён для оптимизации схемы генератора напряжения, результаты которого приведены в табл. 1. Основным недостатком данного подхода является недоступность каких-то конкретных правил и зависимостей между входными и выходными параметрами для большинства схем. Кроме того, ГИ ОА в целом, такие как оптимизатор роя частиц (ОРЧ), китовой ОА (КОА), ОАЯХ и др., имеют тенденцию застревания в локальном оптимуме, и выход из него требует внедрения дополнительных вычислительных процессов.

Скорость сходимости ОА можно увеличить, используя грамотно проинициализированную первичную популяцию, что является начальной точкой процесса оптимизации. В основном предпочтение даётся произвольной выборке (ПВ), чтобы иметь сравнительно равномерно распределённую популяцию. Кроме этого, рассмотрены выборка латинского гиперкуба (ВЛГ), хаотичная инициализация (ХИ) и обучение, основанное на оппозиционных точках (ОООТ).

В основе ВЛГ лежит принцип разделения диапазона значений каждого входного параметра на интервалы равной длины. Таким образом, координаты выбираются произвольно из каждого интервала так, чтобы в одной строке или столбце матрицы выходных точек было не более одной. В результате этого процесса получаются точки, равноудалённые друг от друга и равномерно распределённые по диапазонам доступных значений входных параметров. Недостатком метода является зависимость от случайных величин, которые не гарантируют устойчивое поведение, особенно при больших размерностях задачи.

Таблица 1

Сравнительные результаты оптимизации генератора напряжения

Название параметра	Предельное значение	Результирующее значение ГА	Результирующее значение обновлённого ГА
Частота генерации	2,5 ГГц	2,56	2,46
Усиление	85 МГц/В	86,3	84,5
Фазовый шум	≤ -115 дБ/Гц	-120,4	-120,3
Средний ток	$\leq 1,6$ мА	1,52	1,49

ХИ, в свою очередь, для обеспечения разнообразия точек опирается на хаотичные функции, которые вызываются заранее определённое количество раз. Недостатком метода является отсутствие предварительных знаний о том, какая из функций проявит себя лучше всего для конкретной задачи.

ОООТ для генерации популяции сначала использует любой другой подход для получения начальных N точек. Далее выполняются подсчёт координат их оппозиционных N точек и оценка приспособленности для данной задачи, после чего извлекаются N лучших кандидатов. Недостатком подхода, конкретно для использования в оптимизации ИС, является необходимость оценки $2N$ кандидатов, что означает в два раза больше моделирований, чем в остальных алгоритмах.

Чтобы снизить общее количество моделирований во время оптимизации, рассмотрена система замены моделирующего программного средства на ИНС. Она позволит после определённого количества симуляций и обучения осуществлять

оценку приспособленности кандидатов напрямую через ИНС, исключая самую трудоёмкую часть из процесса (рис. 3). Эта система была встроена в ГА (ИНС-ГА) для оптимизации двухкаскадного операционного усилителя (ОУ, ДОУ), результаты которого приведены в табл. 2.

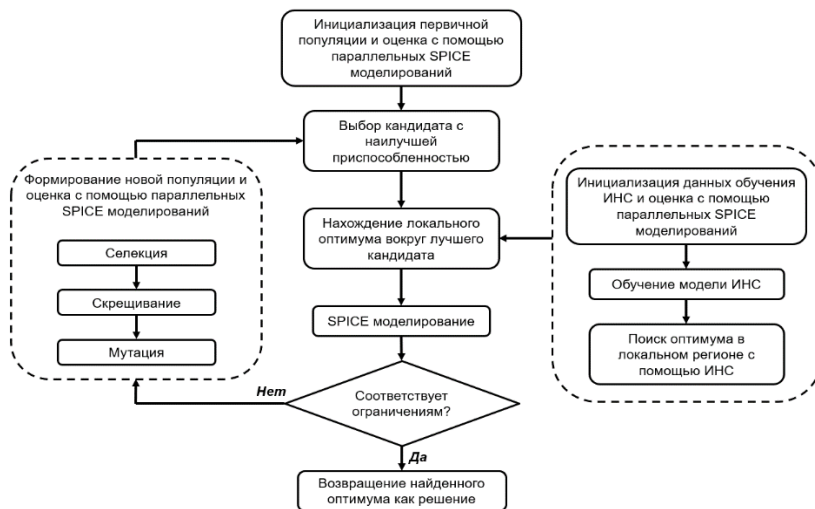


Рис. 3. Схема выполнения ГА с внедрённой ИНС для локального поиска

Таблица 2
Сравнительные результаты оптимизации ДОУ при помощи ГА и ИНС-ГА

Название параметра	Предельное значение	Результурующее значение ГА	Результурующее значение ИНС-ГА
Усиление	Max дБ	90,765	98,760
Пропускная способность	Max Гц	548,455	543,308
Частота единичного усиления	Max МГц	17,314	37,199
Фазовый запас (ФЗ)	$\geq 60^\circ$	65,692	61,494

Недостатком использования ИНС является количество симуляций, необходимых для формирования данных обучения, чтобы обеспечить необходимый уровень точности “предсказаний”. На рис. 3 приведена схема реализации только локального поиска с помощью ИНС; для глобального поиска, даже при наличии данных от тысяч симуляций, уровень точности всё равно неприемлем (табл. 3). Следовательно, общий

процесс требует наличия большого количества вычислительных ресурсов и параллелизации вычислений, что не всегда реализуемо.

Таблица 3

Сравнительные результаты обучения глобальной и локальной ИНС

Модель	Диапазон проектных параметров	Параметры модели	Объём обучающих данных	Средняя относительная ошибка (%)
Глобальная ИНС	[0,7 ÷ 1,3]	[32, 32, 32, 32, 32]	45583	30,2
Локальная ИНС	[0,95 ÷ 1,05]	[16]	632	0,758

Учитывая количество ИС, одновременно находящихся на стадии оптимизации во время проектирования, вышеуказанные проблемы являются критическими. Необходима разработка новых подходов, которые позволят более эффективно обнаруживать кандидаты ИС, удовлетворяющие заданным ограничениям, при этом выполняя меньшее количество моделирований.

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

Метод повышения эффективности поиска решения для ОА в контексте автоматизированного выбора параметров ИС

В ГИ ОА основным препятствием для более широкого охвата зоны поиска является либо отсутствие явного разделения фаз глобального и локального поиска, либо недостаточное количество применяемых стратегий обновления позиций кандидатов. Для решения этих проблем предложен гибридный алгоритм, использующий операции ГА во время глобального поиска, и четыре подхода из ОАЯХ для локального поиска.

В частности, для ГА используется связка селекции, основанной на методе рулетки, равномерного скрещивания и многоточечной мутации, для обеспечения высокого уровня охвата поискового пространства. ОАЯХ в первичном виде совмещает в себе шесть стратегий поиска, две из которых используются в глобальной фазе и зачастую не всегда в состоянии обеспечить необходимый уровень разнообразия в начальных итерациях поиска. Однако четыре стратегии локального поиска хорошо проявили себя с точки зрения исследования небольших зон окружения. Поэтому в ГА-ОАЯХ внедрены стратегии локального поиска, выбор которых осуществляется при помощи внутренних параметров, зависящих от случайных факторов и индекса текущей итерации. Общая схема выполнения ГА-ОАЯХ приведена на рис. 4.

Для проверки эффективности предложенного метода были рассмотрены три ИС разной степени сложности, в частности ДОУ, декодер высокой мощности (ДВМ) и ОУ со встроенным каскодом (ОУВК) (рис. 5). Соответствующие ограничения, налагаемые на процесс оптимизации, приведены в табл. 4-6, а сам процесс реализован в качестве однокритериальной задачи нахождения минимума функции приспособленности, которая приведена в следующем выражении:

$$\text{Приспособленность} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N w * e^{-\frac{2V_i}{V_i+LB_i}}, & \text{если } V_i \leq UB_i \\ \sum_{i=1}^N w * e^{-\frac{UB_i+V_i}{2V_i}}, & \text{если } V_i > UB_i \end{cases}, \quad (1)$$

где V_i соответствует измерённому значению i -го выходного параметра; LB_i и UB_i - нижняя и верхняя допустимые границы значения i -го параметра, а w является штрафным коэффициентом.

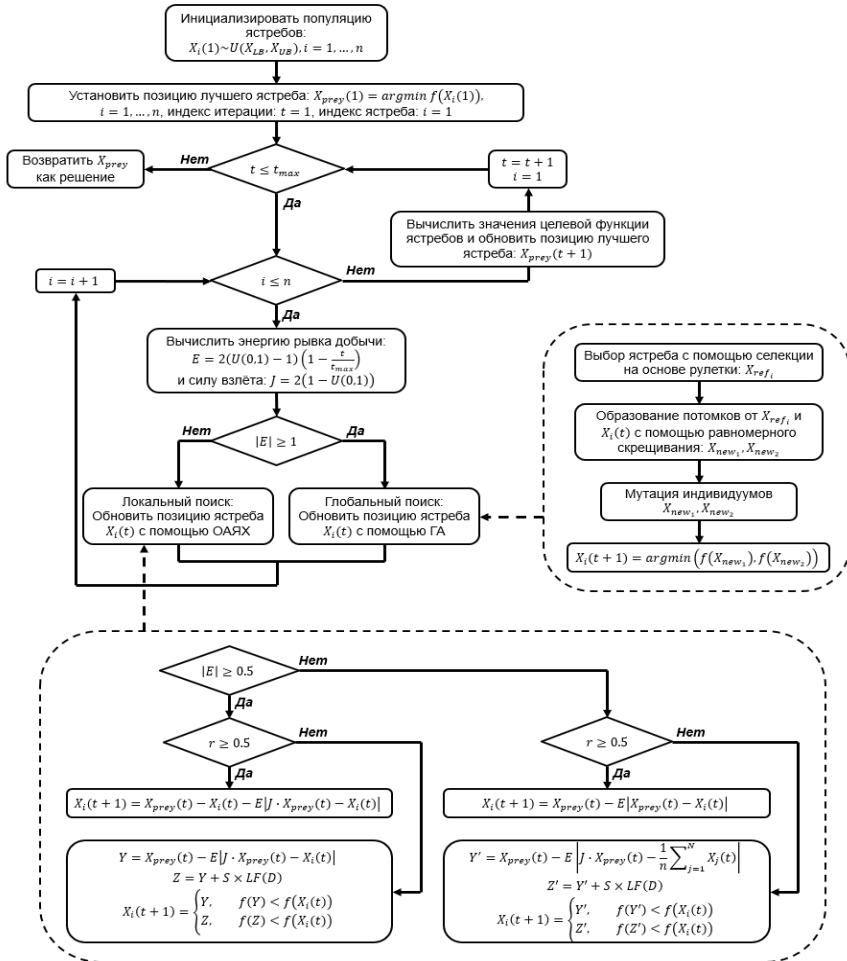


Рис. 4. Схема выполнения ГА-ОАЯХ

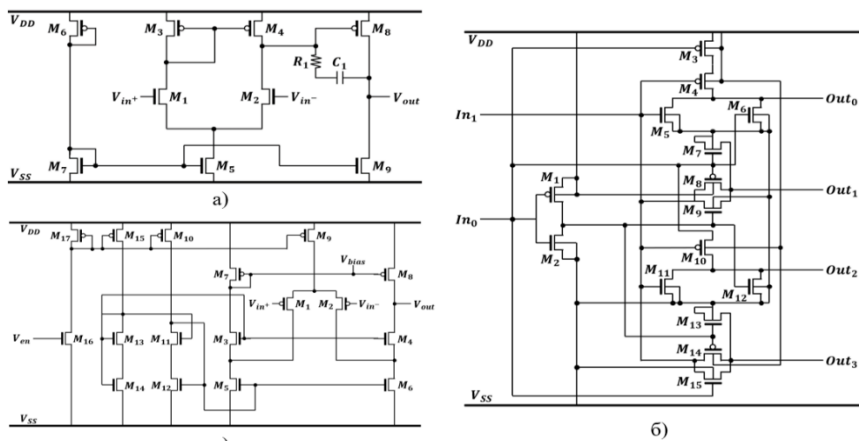


Рис. 5. Схемы оптимизированных ИС: а - ДОУ, б - ДВМ, в - ОУВК

Таблица 4

Ограничения, налагаемые на процесс оптимизации ДОУ

Название параметра	Предельное значение	Название параметра	Предельное значение
Усиление	≥ 60 дБ и ≤ 90 дБ	Запас усиления (ЗУ)	≥ -50 дБ и ≤ -10 дБ
ФЗ	$\geq 30^\circ$ и $\leq 90^\circ$	ПС	≥ 350 МГц и ≤ 550 МГц

Таблица 5

Ограничения, налагаемые на процесс оптимизации ДВМ

Название параметра	Предельное значение	Название параметра	Предельное значение
$Out_* T_{rise}$	≥ 29 пс и ≤ 35 пс	$Out_* P_{rise}$	≥ 0 пс и ≤ 10 пс
$Out_* T_{fall}$	≥ 29 пс и ≤ 35 пс	$Out_* P_{fall}$	≥ 0 пс и ≤ 10 пс

Таблица 6

Ограничения, налагаемые на процесс оптимизации ОУВК

Название параметра	Предельное значение	Название параметра	Предельное значение
Усиление	≥ 70 дБ и ≤ 90 дБ	ЗУ	≥ -50 дБ и ≤ -20 дБ
ФЗ	$\geq 70^\circ$ и $\leq 90^\circ$	ПС	≥ 40 МГц и ≤ 500 МГц

Сам процесс оптимизации был выполнен 100 раз для каждой из наблюдаемых схем с четырьмя другими ОА, результаты которого приведены в табл. 7-9. Опираясь на эти данные, можно сделать вывод, что предложенный метод по производительности превосходит другие рассмотренные методы в среднем на 48,11%.

Таблица 7

Сравнительные результаты оптимизации ДООУ при помощи ГА-ОАЯХ

Тип значения	Результирующее значение приспособленности				
	ГА-ОАЯХ	ГА	ОАЯХ	КОА	ОРЧ
Лучшее	10,322	10,859	10,65	10,621	10,49
Худшее	12,598	394,819	12,701	13,148	12,894
Среднее	11,884	46,013	12,551	12,057	11,953

Таблица 8

Сравнительные результаты оптимизации ДВМ при помощи ГА-ОАЯХ

Тип значения	Результирующее значение приспособленности				
	ГА-ОАЯХ	ГА	ОАЯХ	КОА	ОРЧ
Лучшее	40,718	40,75	41,236	40,956	41,15
Худшее	75,485	77,771	1063,507	417,664	97,25
Среднее	42,453	47,642	124,636	87,534	45,27

Таблица 9

Сравнительные результаты оптимизации ОУВК при помощи ГА-ОАЯХ

Тип значения	Результирующее значение приспособленности				
	ГА-ОАЯХ	ГА	ОАЯХ	КОА	ОРЧ
Лучшее	11,294	14,034	13,842	13,236	13,803
Худшее	538,469	772,002	1189,744	885,138	869,849
Среднее	78,675	437,624	505,437	571,349	537,742

Метод эффективной инициализации первичной популяции для ОА

Чтобы устранить зависимость от случайных факторов и исключить необходимость дополнительных вычислительных процессов, разработан детерминистический алгоритм инициализации популяции для ОА, который одновременно рассматривает первичную и вторичную диагонали в диапазоне поиска и, разделяя их на равные части, получает необходимые точки для выборки. Метод носит название “двойная диагональная равномерная инициализация” (ДДРИ). Основным преимуществом метода является тот факт, что сгенерированные равноудалённые точки несут информацию относительно каждой плоскости, что позволяет избежать нежелательной группировки точек в определенных плоскостях (рис. 6). Так как большая часть современных ОА использует линейную итерацию для обновления позиций кандидатов, то это в совокупности с информацией о каждой

плоскости, доступной в равноудалённых точках, и ненулевым итерационным коэффициентом позволяет получить координаты произвольной точки в рассматриваемой области поиска.

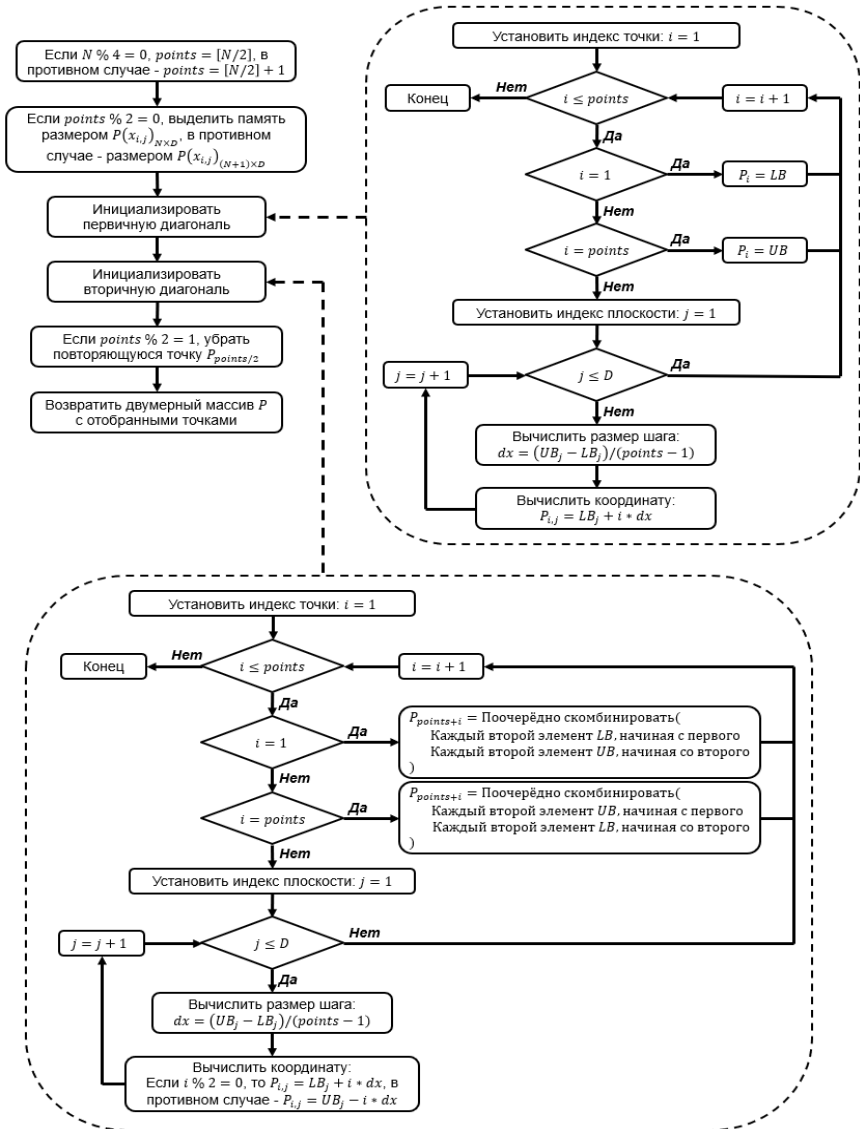


Рис. 6. Схема выполнения ДЦРИ

Чтобы оценить производительность метода, были произведены оптимизации ИС из рис. 5 с ограничениями из табл. 4-6 с использованием КОА для поиска оптимума. Для ДДРИ оптимизация была также выполнена 100 раз с четырьмя другими подходами инициализации, результаты которых приведены в табл. 10-12. На основе этих результатов можно утверждать, что предложенный подход по эффективности превосходит другие рассмотренные стратегии в среднем на 36,97%.

Таблица 10
Сравнительные результаты оптимизации ДОО при помощи ДДРИ

Тип значения	Результирующее значение приспособленности				
	ДДРИ	ПВ	ВЛГ	ОООТ	ХИ
Лучшее	10,33	10,85	10,493	10,433	10,455
Худшее	11,15	11,704	13,087	11,524	11,164
Среднее	10,717	11,431	10,846	10,78	10,97

Таблица 11
Сравнительные результаты оптимизации ДВМ при помощи ДДРИ

Тип значения	Результирующее значение приспособленности				
	ДДРИ	ПВ	ВЛГ	ОООТ	ХИ
Лучшее	40,799	41,251	41,559	40,891	41,159
Худшее	75,209	1061,954	1064,002	77,761	1064,691
Среднее	48,734	278,152	326,717	53,944	147,625

Таблица 12
Сравнительные результаты оптимизации ОУВК при помощи ДДРИ

Тип значения	Результирующее значение приспособленности				
	ДДРИ	ПВ	ВЛГ	ОООТ	ХИ
Лучшее	11,21	12,674	12,904	11,698	11,248
Худшее	545,005	1561,039	549,116	513,846	785,163
Среднее	148,549	412,427	247,681	257,634	347,534

Метод сокращения количества обращений к моделирующему программному обеспечению, реализованный в рамках параметрической оптимизации

Во второй главе была рассмотрена система, заменяющая моделирующую программу на “предсказывающую” ИНС, для которой на каждой итерации поиска нужно собирать новые данные обучения, что соответствует сотням симуляций. Для уменьшения этого числа предлагается внедрить в систему две дополнительные ИНС, называемые “генератор” и “дискриминатор”, формирующие ГСС, которая будет обучаться от уже сформированных данных и на их основе генерировать дополнительные. В дополнение к этому на выходе генератора предлагается использовать ККС, вычисленные от симулированных данных, для раннего

обнаружения генерированных кандидатов, которые не соответствуют тенденциям распределения зависимостей компонентов, обнаруженных во время моделирования. Также для выходного слоя генератора используется сигмоидная функция активации для получения нормализованных данных в диапазоне $[0, 1]$, что позволит облегчить процесс обучения “предсказывающей” ИНС.

Чтобы избежать исчезающих градиентов и нестабильного поведения во время обучения ГСС, была выбрана схема ГСС Вассерштейна с градиентным штрафом (ВГСС-ГШ), в которой функции потерь для дискриминатора и генератора имеют следующую форму:

$$L_D = \nabla_w \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [D_w(G_\theta(z)) - D_w(x) + \lambda(\|\nabla_{\hat{x}} D_w(\hat{x})\|_2 - 1)^2], \quad (2)$$

$$L_G = \nabla_\theta \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m -D_w(G_\theta(z)), \quad (3)$$

в которых $\hat{x} \leftarrow \epsilon x + (1 - \epsilon)G_\theta(z)$, где ϵ - случайное число из диапазона $[0, 1]$; w и θ - обучаемые параметры сетей соответственно генератора и дискриминатора (критик); $x \sim P_r$ - образец из реальных данных; $z \sim p(z)$ - точка из скрытого пространства; λ - штрафной коэффициент, значение которого равно 10. Результирующая схема представлена на рис. 7, а общая система со встроенными обновлениями - на рис. 8.

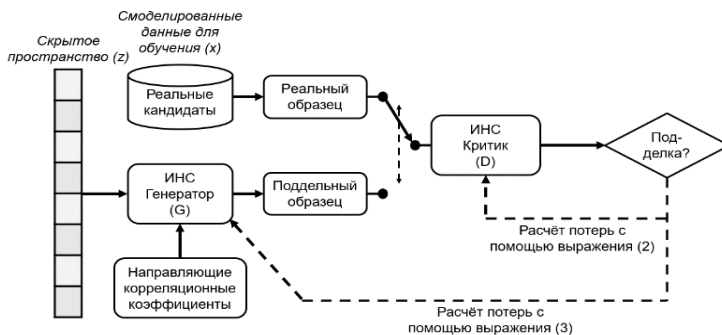


Рис. 7. Схема процесса генерации данных при помощи ВГСС-ГШ со встроенным ККК

Для оценки эффективности системы три ИС из рис. 5 были оптимизированы согласно проектным ограничениям из табл. 4-6, а результаты резюмированы в табл. 13-15. Для ДОУ было сгенерировано 11,25% от общих данных, для ДВМ эта цифра составляет 10,48%, а для ОУВК – 4,87%. Следовательно, предложенная система позволила уменьшить количество вызовов программы моделирования в среднем на 8,86%, при максимальном отклонении сгенерированных данных на 5,02%, за счёт двух дополнительных ИНС, структура которых, в зависимости от текущей задачи, может потребовать серьёзных изменений.

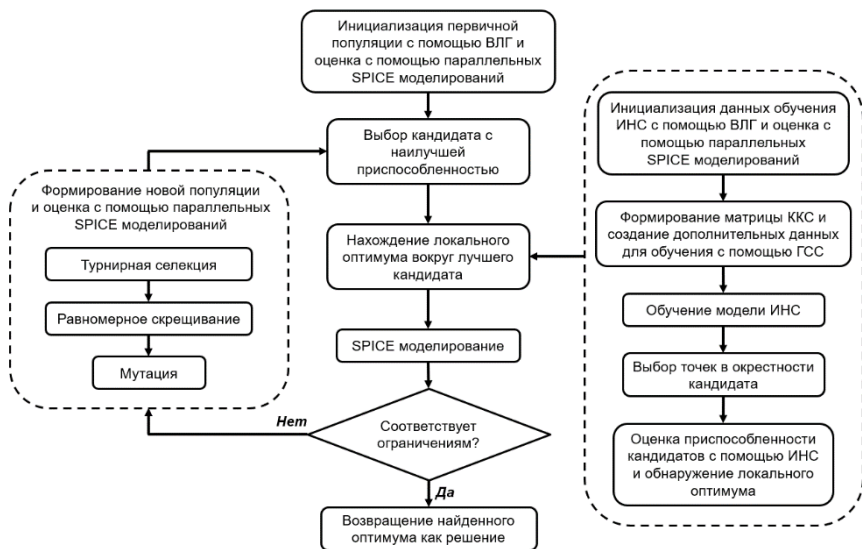


Рис. 8. Схема выполнения ГА со встроеными ИНС и ГСС для локального поиска

Таблица 13

Результаты оптимизации ДОУ с использованием ВГСС-ГШ и ККС

Название параметра	Результирующее значение	Название параметра	Результирующее значение
Усиление	60,032	Пропускная способность	548,2
ФЗ	64,23	Приспособленность	10,883
ЗУ	-22,604		

Таблица 14

Результаты оптимизации ДВМ с использованием ВГСС-ГШ и ККС

Название параметра	Результирующее значение	Название параметра	Результирующее значение
$Out_* T_{rise}$	30,06; 34,95 30,06; 32,67	$Out_* P_{rise}$	9,97; 8,06 9,97; 8,43
$Out_* T_{fall}$	33,56; 29,33 30,2; 34,73	$Out_* P_{fall}$	9,95; 6,42 9,94; 9,92
Приспособленность	41,093		

Результаты оптимизации ОУВК с использованием ВГСС-ГШ и ККС

Название параметра	Результирующее значение	Название параметра	Результирующее значение
Усиление	76,68	Пропускная способность	40,085
ФЗ	71,947	Приспособленность	12,424
ЗУ	-30,927		

В третьей главе представлено разработанное программно-инструментальное средство “ICOptimizer”, которое благодаря удобному интерфейсу, широкому выбору опций оптимизации, быстрому просмотру результатов, коррекции ошибок и универсальной структуре приводит к минимизации человеческого фактора, ограничивая его лишь вводом начальных данных.

ПС состоит из трёх основных окон (рис. 9), в первом из которых пользователь вводит данные о файлах, содержащих информацию относительно схемы, её выходных параметров и проектных ограничений. Во втором окне осуществляется выбор параметров и алгоритмов для оптимизации, также есть опция включения замены симулятора на ИНС во время оптимизации с генерированием.

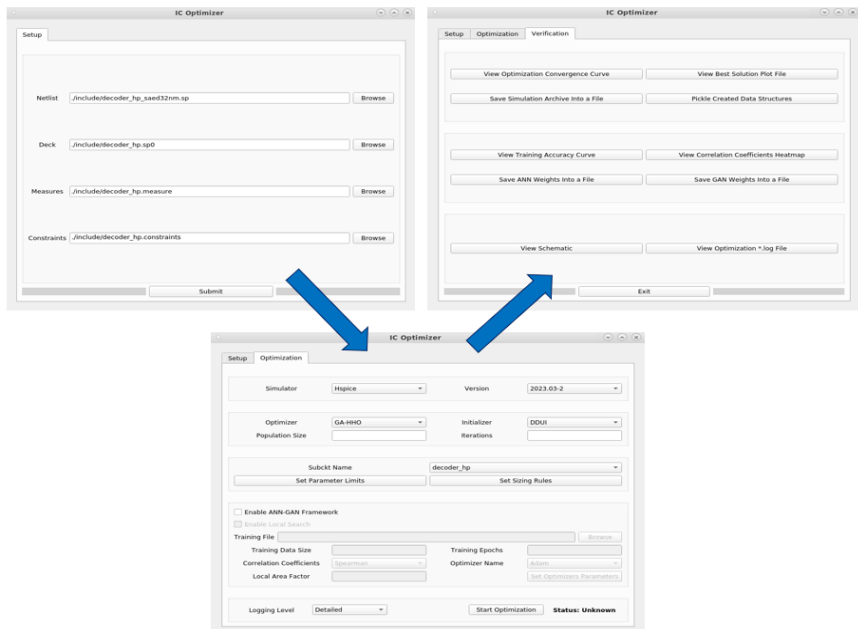


Рис. 9. Окна ввода данных, запуска оптимизации и проверки результатов

Само ПС не зависит от какого-то конкретного вида ИС и может использоваться для оптимизации любого вида узлов. После завершения оптимизации активизируется окно проверки результатов, где пользователь сможет увидеть полученные графики сходимости ОА, значения потерь при обучении ИНС, а также измерений, выполненных для выходных параметров. Все промежуточные данные можно сохранить для дальнейших этапов проектирования ИС.

Для оценки эффективности программного инструмента "ICOptimizer" были оптимизированы ИС из рис. 5 при ограничениях из табл. 4-6. В качестве ОА был использован ГА со включёнными ИНС и ГСС. Сравнительные результаты приведены в табл. 16-18.

Таблица 16

Сравнительные результаты оптимизации ДОУ при помощи ПС "ICOptimizer"

Метод	Усиление	ФЗ	ЗУ	Пропускная способность	Приспособленность
Предложенный метод	60,032	64,23	-22,604	548,2	10,883
Результаты ПС "ICOptimizer"	60,324	65,485	-35,706	452,6	11,381

Таблица 17

Сравнительные результаты оптимизации ДВМ при помощи ПС "ICOptimizer"

Метод	$Out_* T_{rise}$	$Out_* T_{fall}$	$Out_* P_{rise}$	$Out_* P_{fall}$	Приспособленность
Предложенный метод	30,0; 34,9 30,0; 32,6	33,5; 29,3 30,2; 32,6	9,97; 8,06 9,97; 8,43	9,95; 6,42 9,94; 9,92	41,093
Результаты ПС "ICOptimizer"	29,4; 32,4 30,4; 34,7	32,1; 29,8 29,0; 32,3	9,97; 6,89 9,01; 7,23	9,96; 6,54 8,27; 9,55	41,633

Таблица 18

Сравнительные результаты оптимизации ОУВК при помощи ПС "ICOptimizer"

Метод	Усиление	ФЗ	ЗУ	Пропускная способность	Приспособленность
Предложенный метод	76,68	71,947	-30,927	40,085	12,424
Результаты ПС "ICOptimizer"	70,005	76,589	-45,193	40,035	13,231

Максимальная разница результатов оптимизации с использованием программного обеспечения по сравнению с результатами, представленными во второй главе, составляет 4,02%. Следовательно, можно утверждать, что

программное обеспечение за счёт значительного сокращения сроков проектирования и потери точности в допустимых пределах может использоваться в процессе параметрической оптимизации современных ИС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Предложены средства автоматизированной параметрической оптимизации ИС, которые, преобразуя заданную схему и ограничения в однокритериальную или многокритериальную задачу оптимизации, применяют стратегии ГИ ОА и МО для нахождения глобального минимума с наименьшим количеством моделирований.
2. Разработан гибридный алгоритм, основанный на принципах ГИ, который для обеспечения разнообразия особей в популяции на этапе глобального поиска использует стратегии генетического алгоритма (ГА), в частности, сочетание методов отбора на основе рулетки, равномерного скрещивания и многоточечной мутации, а во время локального поиска использует четыре метода из ОА “ястребы Харриса” (ОАЯХ), выбор которых осуществляется через внутренние параметры. В результате решения проблемы нахождения минимума рассмотренных эталонных функций и параметрической оптимизации трёх ИС предложенный подход по эффективности превзошел остальные рассмотренные алгоритмы в среднем на 48,11%.
3. Создан алгоритм инициализации первичной популяции, способствующий увеличению скорости сходимости ОА, осуществляющий пропорциональную выборку по всей длине доступной области поиска и не зависящий от случайных факторов и дополнительных вычислительных процессов, обеспечивающий воспроизводимость результатов. Предложенный метод в задачах минимизации рассмотренных эталонных функций и оптимизации трёх ИС по сравнению с другими методами, обеспечивает в среднем на 36,97% более приемлемые результаты.
4. Разработана система замены программного средства моделирования ИС на искусственную нейронную сеть (ИНС) во время оптимизации, в которой часть обучающих данных формируется с использованием вычислительного процесса на основе генеративно-состязательной сети (ГСС) и корреляционных коэффициентов Спирмена (ККС), что позволяет еще раз сократить количество необходимых симуляций без потери производительности системы. Предложенный подход при параметрической оптимизации рассмотренных трёх ИС позволил реализовать в среднем на 8,86% меньше вызовов программы моделирования.
5. Предложенные в диссертации алгоритмы и системы автоматизированной параметрической оптимизации ИС были реализованы в ПС “ICOptimizer”. Программный инструмент благодаря удобному интерфейсу, определению входных файлов, проверке данных, обнаружению и исправлению ошибок, гибким механизмам ввода данных, связанных с проектными ограничениями, алгоритмами, ИНС и рядом других параметров, позволило сократить процесс проектирования в 3...4 раза. Применение ПС с

использованием механизмов ОА, их инициализацией, заменой на ИНС программы моделирующей схемы при поиске, а также дополнительных средств формирования обучающих данных позволило получить результаты, отличающиеся от эталонных методов в среднем на 4,02%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Hakobyan H.H., Vardumyan A.V., Kostanyan H.T.** Unit Regression Test Selection According To Different Hashing Algorithms // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – 2019. – P. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884444.
2. **Hakobyan H.H., Kostanyan H.T., Vardumyan A.V., Harutyunyan A.G.** Unit Regression Test Selection Based on Several String-Matching Algorithms // Proceedings of NPUA: Information Technologies, Electronics, Radio engineering. – 2020. – No 1. – P. 34-43.
3. **Vardumyan A.V.** An Efficient Primary Population Initialization Method for Metaheuristic Algorithms // Proceedings of the RA NAS and NPUA. Series of Technical Sciences: ISSN:0002-306X. – 2022. – Vol. 75, № 3. – P. 431-442.
4. **Vardumyan A.V., Kostanyan H.T.** A Harris Hawks Optimizer Based Hybrid Algorithm for Optimal Design of Analog Integrated Circuits // 2022 International Conference on Frontiers of Communications, Information System and Data Science (CISDS). - 2022. - P. 143-147, doi: 10.1109/CISDS57597.2022.00031.
5. **Melikyan V.Sh., Vardumyan A.V., Harutyunyan A.G., Asatryan N.A., Melikyan Sh.V., Karapetyan E.Y.** System for automated IC design based on generative adversarial and artificial deep neural networks // Proc. Univ. Electronics. – 2023. – Vol. 28, no. 5. – P. 612–620. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-5-612-620](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-5-612-620).

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ինտեգրալ սխեմաները (ԻՄ) լայնորեն կիրառվում են մարդկային կենսագործունեության համար վճռորոշ մի շարք ոլորտներում: Դա հանգեցրել է տարբեր աստիճանի բարդության տեխնիկական առաջադրանքներին բավարարող հանգույցների նախագծման պահանջարկի կտրուկ աճի:

ԻՄ-երի նախագծման կարևորագույն և ժամանակատար փուլերից մեկը պարամետրական օպտիմալացումն է: Այն հանգում է առանձին բաղադրիչների ֆիզիկական չափերի այնպիսի ընտրության, որոնց դեպքում սխեմայի էլքային ազդանշանների անհրաժեշտ չափումները կբավարարեն առաջադրված սահմանափակումներին: Գործընթացի բարդությունը պայմանավորված է բաղադրիչների բնականոն աշխատանքի վրա երկրորդական գործոնների ազդեցության աճով, որոնցից են պարազիտային տարրերը և արտահոսքի հոսանքները: Այդ հանգամանքը կապակցվելով նմանատիպ ԻՄ-երի տարբեր միջավայրերում ներդնելու և վարքային սահմանափակումներին բավարարելու անհրաժեշտությամբ, ստեղծում է իրավիճակ, երբ միանման հանգույցները հարկավոր է բազմիցս օպտիմալացնել տարբեր գործընթացների և աշխատանքային պայմանների համար: Ուստի, ԻՄ-երի պարամետրերի ընտրության գործընթացի ավտոմատացման միջոցների մշակումը դառնում է արդիական հիմնահարց:

Առկա ճշգրիտ մեթոդները հիմնվում են առաջադրված նախագծային սահմանափակումները օպտիմալացման խնդրի կերպափոխման և ԻՄ-երի բազմաթիվ նմանակումների վրա: Մակայն այդ մոտեցումները գործնական կիրառության տեսանկյունից դեռևս բավարար չեն: Անհրաժեշտություն է առաջանում մշակելու ԻՄ-երի ավտոմատացված պարամետրական օպտիմալացման նոր մեթոդներ, որոնք կիրառելով որոնողական նոր մոտեցումներ և կատարելով քիչ քանակի նմանակումներ, կհայտնաբերեն առաջադրված վարքային սահմանափակումներին բավարարող ԻՄ-ի թեկնածու:

Ատենախոսությունը նվիրված է ԻՄ-երի պարամետրական օպտիմալացման գործընթացի ավտոմատացման հետ առնչվող հիմնահարցերի լուծմանը և նոր ալգորիթմների մշակմանը:

Առաջարկվել են ԻՄ-երի ավտոմատացված պարամետրական օպտիմալացման միջոցներ, որոնք առաջադրված սխեման և սահմանափակումները փոխակերպելով միանպատակային կամ բազմանպատակային օպտիմալացման խնդրի, կիրառում են խմբային բանականությամբ (ԽԲ) օպտիմալացման ալգորիթմների (ՕԱ) և մեքենայական ուսուցման ռազմավարությունները նվազագույն քանակի նմանակումների կատարմամբ զրոբալ մինիմումի հայտնաբերման նպատակով:

Մշակվել է ԽԲ մոտեցումների վրա հիմնված հիբրիդային ալգորիթմ, որը գլոբալ փնտրման փուլում պոպուլյացիայում առանձնյակների բազմազանության ապահովման նպատակով կիրառում է գենետիկ ալգորիթմի ռազմավարությունները, մասնավորապես խաղանիվի ընտրության, համաչափ խաչասերման և բազմակետ մուտացիայի մոտեցումների համադրումը, իսկ լոկալ որոնման ընթացքում օգտագործում է «Հարրիսի բազեներ» ՕՍ-ի 4 տեխնիկաները, որոնց միջև ընտրությունը կատարվում է ներքին պարամետրերի միջոցով: Առաջարկվող մոտեցումը դիտարկված հենանիշ ֆունկցիաների մինիմումի հայտնաբերման և 3 ԻՄ-երի պարամետրական օպտիմալացման արդյունքում կատարողականությամբ գերազանցել է դիտարկված մյուս ալգորիթմներին միջինում 48,11%-ով:

Ստեղծվել է ՕՍ-երի զուգամիտման տեմպերի աճին նպաստող առաջնային պոպուլյացիայի սկզբնարժեքավորման ալգորիթմ, որն առկա փնտրման տիրույթի ողջ երկայնքով իրականացնելով համաչափ նմուշառում և կախված չլինելով պատահականային գործոններից և հավելյալ հաշվարկային գործընթացներից, ապահովելով արդյունքների վերարտադրելիություն, դիտարկված հենանիշ ֆունկցիաների մինիմալացման և 3 ԻՄ-երի լավարկման խնդիրներում, համեմատած մյուս մեթոդների, ապահովել է միջինում 36,97% ավելի լավ արդյունք:

Նախագծվել է լավարկման ընթացքում ԻՄ-երի նմանակման ծրագրային գործիքի արհեստական նեյրոնային ցանցով (ԱՆՑ) փոխարինման համակարգ, որում ուսուցանման տվյալների մի մասը գեներացվում է կիրառելով գեներատիվ-հակամարտող ցանցի և Սպիրմենի հարաբերակցային գործակիցների վրա հիմնված հաշվարկային գործընթաց, ինչը թույլ է տալիս վերստին կրճատել անհրաժեշտ նմանակումների քանակն առանց համակարգի կատարողականության կորստի: Առաջարկվող մոտեցումը, դիտարկված 3 ԻՄ-երի պարամետրական օպտիմալացման ընթացքում, թույլ է տվել իրականացնել նմանակման գործիքի միջինում 8,86% ավելի քիչ կանչ:

Ատենախոսությունում առաջարկված ԻՄ-երի ավտոմատացված պարամետրական օպտիմալացման ալգորիթմներն ու համակարգերն իրագործվել են ICOptimizer ծրագրային միջոցում: Այն օգտագործողի համար հարմարավետ ինտերֆեյսի, մուտքային ֆայլերի սահմանման, տվյալների վավերացման, սխալների հայտնաբերման և շտկման, նախագծային սահմանափակումների, ալգորիթմների, ԱՆՑ-երի և մի շարք այլ պարամետրերի մուտքագրման ձևուն մեխանիզմների շնորհիվ թույլ է տվել կրճատել նախագծման գործընթացը 3...4 անգամ: Ծրագրային միջոցի կիրառումը թույլ է տվել ՕՍ-երի, իրենց սկզբնարժեքավորման, որոնման ընթացքում սխեմաները մոդելավորող ծրագրային գործիքը ԱՆՑ-ով փոխարինման և հավելյալ ուսուցանման տվյալների գեներացման մեխանիզմների կիրառմամբ ստանալ հղումնային մեթոդներից միջինում 4,02% տարբերվող արդյունքներ:

DEVELOPMENT OF DESIGN METHODS FOR AUTOMATED PARAMETRIC OPTIMIZATION OF DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS

SUMMARY

Integrated circuits (IC) are widely used in a number of areas crucial to human life. This has led to a sharp increase in the demand for the design of circuits that meet technical tasks of varying degrees of complexity.

One of the most important and time-consuming phases of IC design is parametric optimization. It boils down to a selection of physical dimensions of individual components, so that the necessary measurements of output signals of the circuit satisfy the imposed constraints. The complexity of the process is conditioned by the increase of the influence of secondary factors on the normal operation of circuit components, among which are parasitic elements and leakage currents. That circumstance, coupled with the need for similar ICs to be embedded into different environments and to satisfy behavioral constraints, creates a situation, where similar circuits need to be optimized for different processes and working conditions. Therefore, the development of means of automating the process of IC parameter selection becomes a topical issue.

Existing precise methods are based on transformation of the given design constraints into an optimization problem and numerous IC simulations. However, these approaches still are not sufficient from the standpoint of practical applications. A need arises to develop new methods for automated parametric optimization of ICs, which, by applying new search approaches and performing a small number of simulations, will discover an IC candidate satisfying the proposed behavioral constraints.

The dissertation is dedicated to solving the problems related to the automation of the IC parametric optimization process and the development of new algorithms.

Means of automated parametric optimization of ICs have been proposed, which transform the given circuit and constraints into a single-objective or multi-objective optimization problem, apply swarm intelligence (SI) optimization algorithms (OA) and machine learning strategies with the goal of finding the global minimum with the least number of simulations.

A hybrid algorithm based on SI approaches has been developed, which, in order to ensure the diversity of individuals in the population, applies genetic algorithm strategies in the global search phase, in particular, the combination of wheel selection, uniform crossover, and multipoint mutation approaches, and uses the 4 techniques of "Harris hawks" OA during the local search, the choice among which is made through internal parameters. As a result of finding the minimum of the considered benchmark functions and parametric optimization of 3 ICs, the proposed approach outperformed the other considered algorithms on average by 48,11%.

A primary population initialization algorithm, contributing to the increase of convergence rate of OAs was created, which, by carrying out proportional sampling along the existing search domain and not depending on random factors and additional calculation processes, ensuring reproducibility of the results, in the problems of minimization of the observed benchmark functions and optimization of 3 ICs, compared to other methods, on average provided 36,97% better results.

A system for replacing the IC simulation software tool with an artificial neural network (ANN) during optimization has been designed, in which a part of the training data is generated using a calculation process based on the generative-adversarial network and Spearman's correlation coefficients, which allows to reduce the number of necessary simulations even further without the loss of performance. The proposed approach during the parametric optimization of the considered 3 ICs allowed to invoke on average 8,86% fewer calls of the simulation tool.

The automated parametric optimization algorithms and systems for ICs proposed in the thesis were implemented in "ICOptimizer" software. Due to its user-friendly interface, flexible mechanisms for defining input files, design constraints, algorithms, ANNs and a number of other parameters, performing data validation, error detection and correction, allowed it to reduce the design process time by 3...4 times. The software tool, by applying OAs, performing their initialization, replacing the software tool that simulates the circuits during the search with an ANN, and utilizing additional training data generation mechanisms, allowed to obtain results that differed by 4,02% from the reference methods on average.