

На правах рукописи



Абу Хазим Монзер Мохаммед Салем

Методы построения высокопроизводительных схемотехнических САПР

Специальность: 05. 13. 12 – Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт Петербург 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования (ФГАОУ ВО) «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), на кафедре «Системы автоматизированного проектирования» (САПР).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Анисимов Владимир Иванович, профессор кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Коробейников Анатолий Григорьевич, заместитель директора по науке Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова» РАН, г. Санкт-Петербург;

кандидат технических наук Пахоменков Юрий Михайлович, руководитель группы центра по проектированию типовой аппаратуры Акционерного общества «Концерн «НПО «Аврора», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 26 сентября 2019 года в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» – «Объявление о защитах».

Автореферат разослан 24 мая 2019 года.

Ученый секретарь совета
диссертационного совета Д 212.238.02



(Сафьянников Н.М.)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Современные электронные устройства характеризуются сложными схемотехническими решениями, что требует выполнять их проектирование с использованием высокопроизводительных схемотехнических САПР. Разработка таких систем автоматизированного проектирования связана со значительными затратами временных и трудовых ресурсов и должна проводиться на основе новых подходов к построению математического и программного обеспечения с учетом специфических особенностей предметной области и характера решаемых задач. Отличительным свойством сложных электронных схем является их слабосвязанная иерархическая структура, следствием которой является незначительная насыщенность значащими элементами всех матриц, которые входят в описание схем. В процессе обработки таких неплотных матриц в различных вычислительных операциях требуется выполнять избыточные вычисления с элементами, имеющими нулевые значения, что существенно увеличивает время решения задач моделирования.

Используемые часто при построении программного обеспечения условные операторы для исключения таких избыточных вычислений не снимают полностью проблему, так как практическая реализация условных операций связана с временными затратами, соизмеримыми с выполнением арифметических операций.

Поэтому для построения современных высокопроизводительных схемотехнических САПР необходимо использовать специальную технологию работы с математическим описанием электронных схем, которое характеризуется незначительной насыщенностью значащими элементами всех матриц, входящих в это описание. Эта технология должна обеспечить устранение избыточных вычислений с элементами, имеющими нулевое значение, и тем самым привести к уменьшению объема занимаемой памяти и к ускорению вычислительных операций.

Общие идеи такой технологии были сформулированы сравнительно давно, однако в существующих отечественных и зарубежных схемотехнических САПР они практически не использованы. Объяснить этот факт можно многими обстоятельствами, среди которых основной является высокая стоимость разработки новых САПР. Кроме того, следует учитывать необходимость затраты значительных временных ресурсов для существенной модификации достаточно громоздкого программного кода интегрированных многофункциональных схемотехнических САПР, в которых при разработке систем технологии сжатия данных в матрицах, имеющих низкую степень заполнения ненулевыми элементами, не были заложены вообще или использовались только далеко не самые эффективные методы сжатия информации в отдельных подсистемах

Вследствие указанных причин решением проблемы может быть только построение современных отечественных схемотехнических САПР, которые будут полностью реализованы с использованием технологии сжатия данных в матрицах, имеющих низкую степень заполнения элементами с ненулевыми значениями, что обеспечит наибольшее увеличение производительности системы

Поскольку все известные в настоящее время методы сжатия данных в матрицах с низкой степенью заполнения ненулевыми элементами характеризуются различными показателями повышения производительности работы и сложностью их практической реализации, то выбор метода сжатия описания при построении схемотехнических САПР должен проводиться только в результате исчерпывающего сопоставительного анализа основных характеристик этих методов. Существенной характеристикой любых методов упаковки данных является также возможность непосредственного использования сжатого описания без перехода к полному описанию задачи на определенных этапах ее решения.

При разработке современных высокопроизводительных схемотехнических САПР целесообразно также сочетать использование технологии упаковки данных в сжатые массивы одновременно с технологией расчета схемы по частям на основе разбиения сложной схемы на слабосвязанные многополюсные подсхемы.

Сочетание технологии расчета сложных схем по частям путем разделения ее на совокупность многополюсных подсхем с технологией работы с неплотными матрицами на основе сжатия описания позволяет обеспечить наивысшую степень повышения производительности схемотехнических САПР. При таком подходе к моделированию сложных схем следует реализовать переход к сжатому описанию подматриц, которыми характеризуются отдельные подсхемы. Формирование такого сжатого описания осуществляется на основе использования технологии списочных структур, применения технологии строчного и симметричного форматов, а также технологии адресных матриц.

Перечисленные технологии обеспечивают различные возможности для разработки программного кода, работающего с сжатой формой представления информации, а также присущую им различную степень повышения производительности систем, построенных на их основе.

Таким образом, задача разработки новых высокопроизводительных схемотехнических САПР, в которых использованы новые алгоритмы и новая методика построения подсистем, выполняющих расчет частотных свойств электронной аппаратуры, статического режима работы электронных схем, переходных характеристик электронных устройств, является весьма актуальной.

Цель диссертационной работы

Целью диссертации является исследование и разработка методов построения высокопроизводительных схемотехнических САПР.

Для реализации такой цели следует выполнить следующее:

1. Дать сопоставительный анализ методов упаковки данных в структурах с низкой степенью заполнения значащими элементами для оценки их функциональных характеристик, как на этапе разработки системы, так и в процессе эксплуатации системы САПР.
2. Провести исследование и осуществить реализацию методики создания высокопроизводительных подсистем для расчета частотных свойств электронных схем с использованием выбранных в результате анализа методов сжатия данных, обеспечивающих наибольшую производительность вычислительного процесса.
3. Исследовать и реализовать методы увеличения производительности систем для расчета статического и динамического режимов работы нелинейных электронных схем на основе выбранных в результате сравнительного анализа методов упаковки данных в структурах с низкой степенью заполнения ненулевыми элементами.
4. Реализовать технологию сжатия данных при расчете сложных схем по частям на основе разделения их на подсхемы путем преобразования к слабосвязанной иерархической структуре.

Объектом исследования являются схемотехнические САПР.

Предметом исследования являются математическое и программное обеспечения высокопроизводительных схемотехнических САПР.

Основные методы исследования

При выполнении поставленных задач использовались методы математического моделирования электронных схем, методы теории сложных систем, принципы объектно-ориентированного программирования, теория матриц, теория конечных графов, численные методы решения уравнений.

Новые научные результаты

1. Предложены методы виртуального выполнения матричных операций при формировании и обработке сжатого описания электронных схем без предварительного построения неплотных матриц моделируемой схемы.
2. Разработана методика повышения производительности систем автоматизации схемотехнического проектирования на основе использования технологии адресных матриц.
3. Разработана методика построения высокопроизводительных схемотехнических САПР на основе двухэтапной технологии сжатия данных в симметричном формате.
4. Разработана методика моделирования больших схем по частям, сочетающая декомпозицию слабосвязанных систем с технологией сжатия данных.
5. Реализованы методы построения высокопроизводительных схемотехнических САПР, выполняющих расчет статического и

динамического режимов работы нелинейных электронных устройств и расчет частотных характеристик линеаризованных схем

Практическая ценность результатов диссертационной работы

1. Разработана библиотека, содержащая функции для формирования топологического образа и координатного описания моделируемой схемы.
2. Реализована библиотека, содержащая функции для формирования параметрического представления электронной схемы на основе ее координатного описания схемы без обработки исходных матриц
3. Реализовано программное обеспечение для виртуальной обработки сжатого описания электронной схемы без восстановления ее полного описания.

Выносимые на защиту положения,

1. Методы разработки высокопроизводительных схемотехнических САПР с использованием технологии адресных матриц
2. Двухуровневая структура программного обеспечения схемотехнических САПР на основе топологического образа электронной схемы с последующим обработкой ее параметрического сжатого описания.
3. Методы виртуальной реализации матричных операций при обработке сжатого описания электронной схемы в симметричном формате.
4. Методика построения сжатого описания подсхем при декомпозиции электронной схемы на слабосвязанные подсхемы.

Достоверность результатов подтверждена материалами опытной эксплуатации схемотехнической САПР в различных режимах работы, и обсуждением полученных результатов на конференциях различного уровня.

Практическая реализация и внедрение результатов

Полученные результаты положены в основу программного обеспечения схемотехнической САПР, в которой реализована технология адресных матриц и технология сжатого описания в симметричном формате. При разработке системы широко использовалась построенная в диссертационной работе библиотека для формирования топологического образа моделируемой схемы и библиотека для формирования ее параметрического описания

Результаты диссертационной работы использовались на предприятии «Модем» при создании электронной аппаратуры для современных систем связи, а также в учебном процессе кафедры Системы автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при изучении дисциплин для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Информатика и вычислительная техника».

Апробация работы

Основные результаты докладывались на научно-практических

конференциях:

- Международные конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» Одинцово 2015 г., 2016 г., 2017 г, 2018 г.;
- XIIII-ая и XIV-ая международные конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2017 г. 2018 г.;
- Конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ

Публикации

Основное теоретическое и практическое содержание диссертации опубликовано в 14 научных работах, в числе которых 7 - статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК к опубликованию основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 6 работ – в материалах международных конференций, 1 Свидетельство программы ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, четыре главы основного содержания, заключение и список литературы, содержащий 71 источников. Работа изложена на 160 страницах текста, и содержит 18 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности диссертационной работы, определяются ее цели и задачи, формулируются основные положения, которые выносятся на защиту, излагаются основные научные и практические результаты диссертационной работы, обосновывается их новизна.

Первая глава диссертационной работы посвящена сопоставительному анализу возможных методов сжатой обработки неплотных матриц. Отмечается, что, непосредственное применение таких неплотных матриц при разработке программного кода для решения уравнений приводит к появлению избыточных вычислений с элементами, имеющими нулевые значения, которые существенно затягивают процесс вычислений. Следовательно, для построения высокопроизводительного программного обеспечения современных схемотехнических САПР необходимо использовать специальную технологию работы с неплотными матрицами, которая позволит полностью устранить избыточные вычисления и тем самым повысить производительность системы.

Хотя основные идеи технологии хранения и обработки неплотных матриц были сформулированы достаточно давно, в существующих схемотехнических САПР они практически не внедрены в практику построения систем. Причин для этого достаточно много, среди них основной следует считать высокую стоимость разработки новых САПР. Следует также учитывать, большую трудоемкость переработки существующих интегрированных многофункциональных систем, в которых изначально технологии сжатия

данных в неплотных матрицах, имеющих низкую степень заполнения ненулевыми элементами, не были в полной мере заложены.

Поскольку все известные в настоящее время методы сжатия информации в неплотных матрицах с низкой степенью заполнения ненулевыми элементами существенно отличаются своими характеристиками и трудоемкостью построения на их основе схемотехнических САПР, то выбор метода сжатия данных необходимо выполнить после выполнения сравнительной детальной оценки возможных методов с учетом всех определяющих факторов, как на этапе разработки системы, так и в процессе эксплуатации САПР в реальных условиях. Весьма важной характеристикой используемых методов сжатия информации является также возможность их применения для обработки данных непосредственно в сжатом описании без выполнения даже временного восстановления полного описания электронной схемы, поскольку необходимость такого восстановления полностью ликвидирует все выгоды сжатой обработки информации при помощи выбранного способа сжатия информации в неплотных матрицах с низкой степенью заполнения ненулевыми элементами.

Основные показатели известных методов сжатой обработки неплотных матриц значительно отличаются друг от друга. Следовательно, для обоснованного выбора метода сжатия данных необходимо провести сравнительную оценку возможных методов, которая выполнена в диссертационной работе. В качестве критериев оценки в диссертационной работе приняты:

а) способность метода выполнять введение в реализуемое сжатое описание новых ненулевых элементов, неизбежно появляющихся при решении уравнений;

б) степень экономии использования памяти $\beta = M/M_1$, где M – объем памяти, который необходим для описания полностью заполненной плотной матрицы, M_1 – объем памяти, которую занимает ее сжатое описание.

В результате анализа основных характеристик возможных подходов к решению задачи построения сжатого описания электронной схемы отмечается, что наиболее простую процедуру сжатия данных обеспечивает метод адресных матриц, однако этот метод имеет сравнительно невысокие качественные показатели. Однако существенным достоинством метода адресных матриц следует считать допустимость включения новых значащих элементов, появляющихся в процессе решения матричных уравнений.

В диссертационной работе формулируются две основные задачи, которые необходимо решать при использовании метода адресации для сжатия данных. Во-первых, необходимо реализовать формирование сжатого описания электронной схемы, а во вторых выполнить решение матричного уравнения схемы на основе ее сжатого описания. В диссертации описывается практическая технология решения этих задач, позволяющая достаточно просто модифицировать существующее программное обеспечение для работы с полными матрицами в аналогичный код, функционирующий на основе сжатого

описания. Для этой цели в диссертационной работе предложены структурные схемы функций, обеспечивающих решение задач, возникающих при использовании метода адресации для сжатия данных.

В работе делается вывод, что методы неизменного формата не обеспечивают возможность включения в сжатые массивы элементов в произвольном порядке, и не позволяют дополнять сжатое описание новыми элементами, вследствие чего их невозможно непосредственно использовать для расчета электронных схем моделирования.

Для обеспечения возможности работы с новыми элементами в сжатом описании на основе симметричных матриц предлагается применять двухэтапную технологию с предварительным формированием топологического образа моделируемой схемы. При этом на первом этапе должна решаться задача формирования топологического образа моделируемой схемы.

На втором этапе должна решаться задача параметрического формирования сжатых массивов, формат которых определен на первом этапе с учетом зарезервированных мест для новых ненулевых элементов, которые появляются в процессе решения уравнений.

Важно подчеркнуть, что процесс моделирования электронных схем, как правило, связан с выполнением многовариантных или итерационных расчетов одной и той же схемы. Поэтому топологический этап в этом процессе выполняется единственный раз, в то время как параметрический этап выполняется многократно и временные затраты на выполнение топологического этапа в общих временных затратах на вычислительный процесс оказываются пренебрежимо малым.

Отсюда следует, что на основе двухэтапной технологии оказывается практически возможным использовать метод сжатой обработки неплотных матриц на основе симметричного формата, который представляет наибольший интерес при моделировании больших систем, поскольку отличается наибольшим степенью экономии объема и наименьшими накладными расходами.

В результате выполненного исследования качественных показателей методов сжатия описания электронных схем в работе сделан вывод, что наивысшими показателями с точки зрения экономии памяти и увеличения скорости вычислительных операций характеризуется метод симметричного формата с двухэтапной процедурой сжатия данных. Заслуживает внимание и метод адресации, поскольку он обеспечивает наиболее простую технологию решения задачи сжатия информации.

Во второй главе выполняется исследование методов построения высокопроизводительных подсистем для расчета частотных свойств электронных схем. Для формирования математического описания используется модифицированный координатный базис, в котором возможно использование неявной формы задания компонентных уравнений, что значительно расширяет область его применения.

В диссертационной работе делается вывод, что возможные способы

решения задачи расчета частотных свойств существенно отличаются друг от друга для различных подходов к технологии упаковки данных.

В работе рассматриваются технологии сжатой обработки при использовании двух наиболее перспективных для создания высокопроизводительных схемотехнических САПР методов сжатия данных – метода адресации, который обеспечивает минимизацию затрат при разработке подсистем и метода симметричного формата с двухэтапной процедурой сжатия данных, обеспечивающего наилучшие качественные показатели.

В работе показано, что специфические особенности метода адресации позволяют легко выполнять модернизацию программного кода схемотехнической САПР, в которой не реализована технология сжатия описания, в программный код, реализующий эту технологию. При этом приходится решать две проблемы. Во-первых, необходимо дополнить программное обеспечение кодом, обеспечивающим формирование сжатого описания электронной схемы. Во-вторых, необходимо модифицировать функции, выполняющие процедуру решения уравнений, построенных согласно выполненному сжатию информации.

Для решения первой задачи необходимо сформировать матрицу A , а также сжатые массивы WZ и SZ согласно описанию электронной схемы. При формировании сжатого массива WZ необходимо вызвать функцию $set(int i, int j, Tz)$, блок-схема которой приведена на рисунке 1.

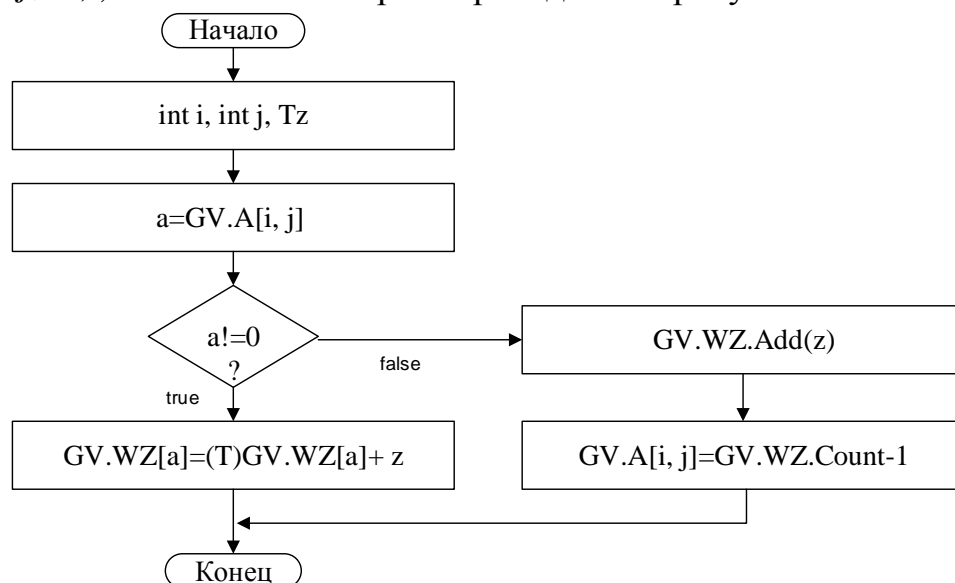
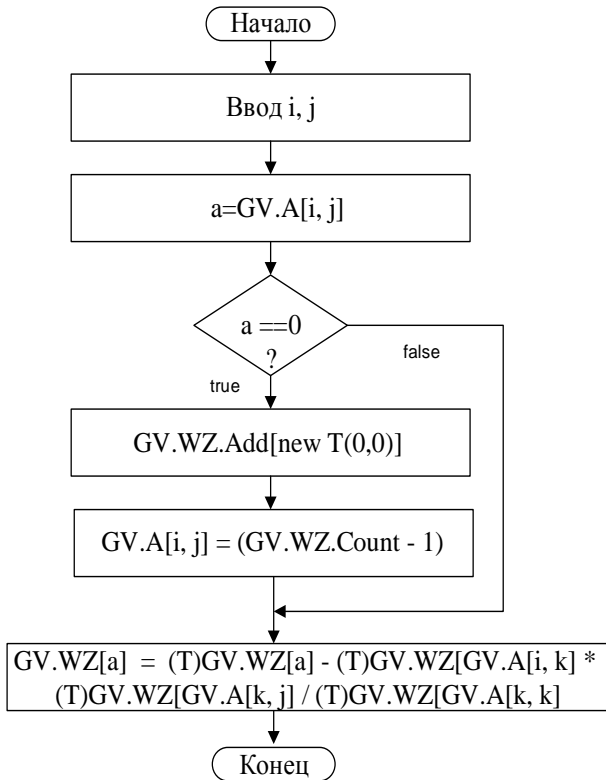


Рисунок 1. Блок-схема формирования сжатого описания схемы

Массив SZ формируется согласно аналогичной блок-схеме.

Как известно, реализация решения уравнения методом Гаусса или на основе LU-разложения связана с проведением k -го шага преобразования к треугольной матрице, что требует пересчета элементов матрицы согласно выражению $w[i, j] = w[i, j] - w[i, k] * w[k, j] / w[k, k]$;

Рисунок 2. Блок - схема выполнения k -го шага

Процесс формирования сжатого описания схемы для случая частотно-зависимого управляемого источника с передаточной функцией

$$y = y(s) = y_0 \frac{1 + s\tau_1}{1 + s\tau_2},$$

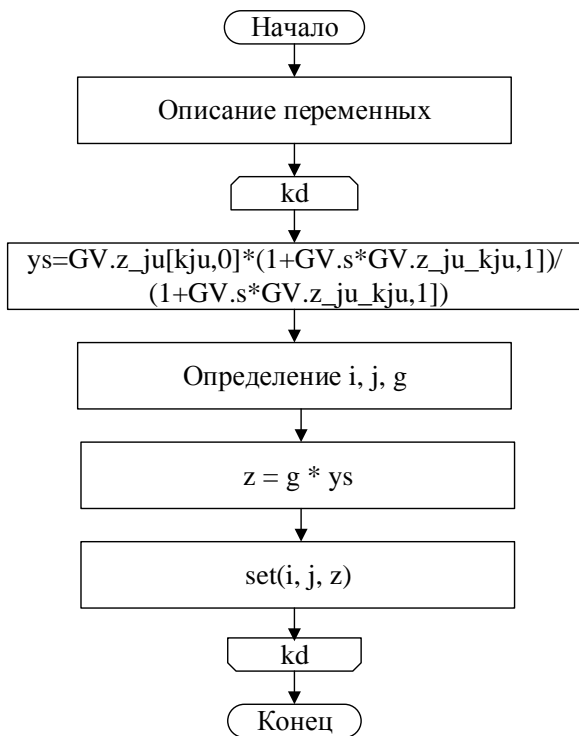


Рисунок 3. Структурная схема функции формирования сжатого описания управляемого источника

Если программный код содержит сжатое описание, то полное описание исходной неплотной матрицы в этом коде не содержится. Следовательно, для выполнения k -го шага приведения к треугольной матрице должна вызываться на каждом шаге некоторая функция (например $step_w(i, j)$). Предложенная в работе блок-схема такой функции изображена на рисунке 2.

После окончания работы функции $step_w(i, j)$ в сжатом массиве WZ будет реализован k -й шаг преобразования к треугольной матрице. Приведение к треугольной матрице выполняется виртуально, так как полная матрица электронной схемы в описании не существует.

приведен на рисунке 3.

Основное отличие этой структурной схемы заключается в присутствии в ней функции $set(i, j, z)$, обеспечивающей работу с адресной матрицей. Для реализации такой функции в задачах расчета частотных свойств необходимо использовать комплексный тип данных.

Включая функцию $set(i, j, z)$ в традиционные структуры функций формирования описания компонентов схемы нетрудно построить соответствующие функции работы системы по технологии адресных матриц, обеспечивающей сжатую обработку описания.

В диссертационной работе учитывается, что в процессе работы с

сжатым описанием на основе двухэтапной технологии исходная неплотная матрица W в описании не существует и для построения вычислительного

процесса необходимо установить взаимосвязь элементов полной матрицы с адресами, определяющими местоположение элементов в сжатом описании.

Выполнение первого топологического этапа двухэтапной технологии начинается с заполнения массива C единичными или нулевыми значениями. Целью топологического этапа является отображение в матрице C наличия или отсутствия ненулевого элемента в той или иной исходной матрице, т.е. здесь будет содержаться информация о структуре расположения ненулевых элементов в исходной матрице W . В нулевом столбце матрицы C располагается описание структуры ненулевых элементов в задающем векторе S . В нулевой строке матрицы C следует отобразить содержание вектора перестановок P , в $n+1$ столбце содержится информация о значащих элементах в соответствующей строке, которая будет использоваться для принятия решения о выборе очередного шага перестановок. Если в неплотной матрице элемент не равен нулю, то соответствующему элементу индексного массива $C[i, j]$ должно присваиваться единичное значение. Такая задача практически реализуется путем создания совокупности методов $sform_comp(C)$ для всех типов компонентов $comp$ моделируемой схемы. Затем выполняется LU-преобразование матрицы C с проведением перестановок строк и столбцов для уменьшения числа дополнительных значащих элементов в описании схемы и в заключении топологического этапа на основе топологического образа формируются координатные матрицы WJI , ERC , SI .

На параметрическом этапе на основании уточненного формата сжатого описания открываются и формируются массивы для матриц D , UP , LOW , SZ . Исходными данными для параметрического этапа построения сжатого описания являются целочисленные массивы, описывающие включение полюсов компонентов в электронной схеме, и вещественные массивы, содержащие значения параметров компонентов.

После осуществления параметрического этапа LU-преобразования реализуется вычисление переменных схемы и осуществляется их перекодировка согласно выполненным перестановкам. При работе с сжатым описанием исходная сжатая матрица W в описании не существует и LU-преобразование должно выполняться виртуально путем обработки сжатых массивов D , UP , LOW , т.е. для этой цели используется специальный алгоритм LU-преобразования, отличающийся от известных алгоритмов общего вида.

В третьей главе рассматривается методика построения высокопроизводительных подсистем для расчета статического режима и переходных характеристик электронных схем. На основании проведенного исследования делается вывод, что для решения таких задач наиболее целесообразно использовать схемотехническую интерпретацию метод Ньютона-Рафсона, используя его схемотехническую трактовку. Поскольку метод Ньютона-Рафсона обеспечивает сходимость итерационного процесса только для монотонного вида всех функций $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ общего функционала $\Phi(X)=0$, то для возможности применения его схемотехнической интерпретации следует

выбирать начальное приближения вблизи от точки решения. Для этого в работе предлагается реализовать метод продолжения решения по параметру, который может быть построен путем использования различных способов разгона – метода взвешенных источников, на основе взвешенных ветвей и путем наложения взвешенного дерева. В диссертации показано, что самым рациональным является способ наложения дерева взвешенных ветвей, основанный на подключении между базисным узлом и каждым узлом схемы фиктивных двухполюсников, проводимость y которых определяется выражением

$$y = y_0 (1 - \lambda) / \lambda.$$

При решении задачи расчета статического режима значение λ изменяется в пределах от λ_{\min} до 1 с некоторым шагом $\Delta\lambda$, при этом для $\lambda = 1$ фиктивные двухполюсники отключаются и на последнем шаге выполняется расчет исходной схемы. Для электронных схем можно принять значение $\lambda_{\min}=10^{-3}$, $y_0 = 1$, что обеспечивает максимально близкое приближение свойств моделируемой схемы к линейной структуре, и, следовательно, существование сходимости на первом шаге.

При расчете статического режима путем использования метода адресации вместо формирования неплотной матрицы W^i и вектора S^i для i -й итерации этапа линеаризации, необходимо использовать сжатие данных. При этом выполняется включение в сжатые массивы WZ и SZ значений, определяемых топологией схемы и параметрами компонентов. В результате сжатия данных элементы матрицы W^i будут включены в сжатый массив WZ , а все элементы вектора S^i будут занесены в сжатый массив SZ .

При расчете статического режима нелинейных электронных схем на основе симметричного формата традиционная задача формирования полного описания неплотной матрицы W^i и вектора S^i для i -й итерации на этапе линеаризации нелинейных компонентов заменяется формированием сжатого описания, целью которого является занесение в сжатые массивы D , UP , LOW , SZ параметров компонентов и некоторых значений, определяемых топологией схемы. В результате сжатия данных содержание матрицы W^i будет включено в сжатые массивы D , UP , LOW , а все составляющие вектора S^i будут занесены в сжатый массив SZ . Методика формирования сжатых массивов D , UP , LOW , SZ в целом аналогична методике, используемой при расчете частотных свойств электронных схем.

Построение подсистемы схемотехнической САПР для расчета переходных характеристик основано на описании нелинейных электронных схем уравнениями вида $F(\dot{X}^{k+1}, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0$, решение которых в работе предлагается проводить на основе неявных методов Гира высших порядков на основании обобщенной формулы

$$X^{k+1} = \sum_{j=1}^m a_j^n X^{k+1-j} + hb_0^n \dot{X}^{k+1}$$

Для решения используется формула коррекции Гира, которая может быть получена из обобщенной формулы решением ее относительно вектора производных, что дает

$$\dot{X}^{k+1} = \frac{\alpha_0}{h} X^{k+1} + \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m \alpha_j X^{k+1-j}$$

При практической реализации метода вместо подстановки значений производных в общее уравнение схемы $F(\dot{X}^{k+1}, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0$, осуществляется подстановка производных непосредственно в уравнения инерционных компонентов (двухполюсники типа R, C, L, частотно зависимые управляемые источники), что позволяет получить дискретные модели компонентов, которые приведены в диссертации.

В диссертационной работе рассмотрена общая методика моделирования динамического режима нелинейных электронных схем на основе сжатии данных методом адресации матриц и методом симметричного формата. Для обоих методов вместо формирования неплотной матрицы W_i^k и вектора S_i^k для k-го временного шага на i-й итерации линеаризации нелинейных компонентов, выполняется сжатие данных, целью которого является занесение в сжатые массивы некоторых значений, определяемых топологией электронной схемы и параметрами ее компонентов. Методика построения сжатых массивов в целом аналогична методике, рассмотренной в диссертационной работе при решении задач в частотной области, основное различие заключается в замене типа данных Complex на тип double и использовании дискретных моделей компонентов.

При использовании для расчета динамического режима методов интегрирования высших порядков необходимо выполнять разгон системы, последовательно применяя для расчета методы низших порядков, начиная с первого, с тем, чтобы накопить информацию о предшествующих шагах, поскольку в расчетные формулы для дискретных моделей компонентов входят значения переменных на предыдущих шагах расчета.

Процедура разгона не затрагивает топологический этап двухэтапной процедуры расчета на основе симметричных матриц, поскольку выполнение этого этапа не связано с использованием информации о предшествующих шагах. Что же касается параметрического этапа, то его выполнение реализуется в процессе разгона на основании полученных в работе расчетных соотношений для дискретных моделей компонентов различного порядка.

В четвертой главе рассматриваются вопросы моделирования больших систем на основе методов расчета сложных схем по частям и сжатой обработки неплотных матриц. Сочетание этих методов позволяет наиболее эффективно

обеспечить снижение объема используемой оперативной памяти и уменьшения числа вычислительных операций, требуемых для расчета моделируемой схемы.

Для разделения моделируемой схемы на части в ней выделяется m подсхем, между которыми отсутствуют индуктивные связи через обмотки трансформаторов, а также связи через входные и выходные переменные зависимых источников. В исходной схеме выделяются узлы связи между подсхемами, которые характеризуются узловыми потенциалом v_i , что позволяет образовать из всех узловых потенциалов узлов связи вектор $X_0 = V_0 = [\dots, v_i, \dots]^t$, а в каждой подсхеме вектор внутренних переменных $X_k = [\dots, x_j, \dots]^t$.

Тогда описание электронной схемы может быть представлено матричным уравнением $WX + S = 0$ с блочно-диагональной матрицей W , которая имеет окаймляющую строку и окаймляющий столбец. Для k -й подсхемы блочное уравнение записывается в виде $W_{kk}X_k + W_{k0}X_0 + S_k = 0$, а граничные переменные войдут в последнюю блочную строку $\sum_{k=1}^m W_{k0}X_k + W_{00}X_0 + S_0 = 0$.

Решение матричного уравнения схемы выполняется в четыре этапа.

На первом этапе вводится описание k -й подсхемы и реализуется нормализованный алгоритм Гаусса-Жордано. При этом k -й блочный диагональный элемент преобразуется в единичную матрицу, а подматрицы W_{k0} и S_k преобразуются в блочные элементы \bar{W}_{k0} и \bar{S}_k . После выполнения первого этапа k -я блочная строка будет иметь вид

$$X_k + \bar{W}_{k0}X_0 = \bar{S}_k$$

Отсюда следует выражение для расчета внутренних переменных k -й подсхемы

$$X_k = -\bar{W}_{k0}X_0 - \bar{S}_k \quad (k=1, \dots, m)$$

На втором этапе выполняется исключение вектора X_k из уравнения последней блочной строки, что приводит к уравнению

$$\bar{W}_{00}X_0 + \bar{S}_0 = 0$$

$$\text{где } \bar{W}_{00} = W_{00} - \sum_{k=1}^m W_{0k} \bar{W}_{k0}, \quad \bar{S}_0 = S_0 - \sum_{k=1}^m W_{0k} \bar{S}_k$$

На третьем этапе выполняется расчет вектора переменных связи X_0 , и на четвертом этапе для каждой подсхемы выполняется расчет вектора подсхем X_k .

В диссертационной работе при расчете сложных схем по частям сжатие данных выполняется для отдельных ненулевых подматриц, которые входят в общую матрицу электронной схемы. При этом для k -й подсхемы такими подматрицами являются W_{kk} , W_{k0} , W_{0k} , W_{00} . Однако для упрощения задачи достаточно реализовать сжатие данных только в диагональных блоках, поскольку значительно неплотной является только подматрица W_{kk} .

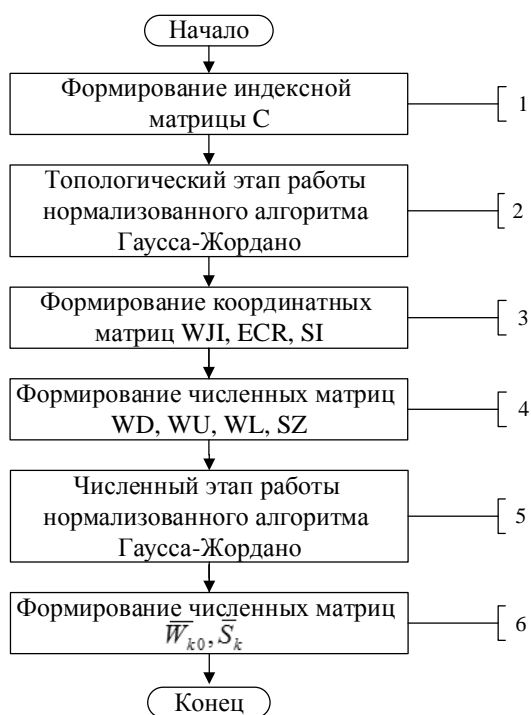


Рисунок 4. Структурная схема сжатого описания k-й подсхемы

Согласно с общей стратегией расчета сложных схем по частям двухэтапная сжатая обработка диагональных подматриц на основе симметричного формата реализуется в соответствии с блок-схемой, приведенной на рисунке 4.

На топологическом этапе (шаги 1-3) достаточно формировать топологические матрицы C только для диагональных подматриц. В процессе обработки топологических матриц C диагональные подматрицы приводятся к единичным матрицам путем использования алгоритма Гаусса-Жордано. На параметрическом этапе (шаги 4-6) на основании уже известного формата описания, формируются численные массивы D , UP , LOW , SZ для диагональных подматриц и выполняется параметрический этап нормализованного алгоритма Гаусса-

Жордано. Практическая реализация методов расчета сложных схем по частям и сжатой обработки данных на основе симметричного формата существенно повышает производительность работы схемотехнических САПР.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы

1. Предложены методы виртуального выполнения матричных операций при формировании и обработке сжатого описания электронных схем без предварительного построения исходных неплотных матриц моделируемой схемы.
2. Разработана методика повышения производительности систем автоматизации схемотехнического проектирования на основе использования технологии адресных матриц.
3. Разработана методика построения высокопроизводительных схемотехнических САПР на основе двухэтапной технологии сжатия данных в симметричном формате.
4. Разработана методика моделирования больших схем по частям, сочетающая декомпозицию слабосвязанных систем с технологией сжатия данных.
5. Исследованы и реализованы методы построения высокопроизводительных схемотехнических САПР, выполняющих расчет статического и динамического режимов работы нелинейных

электронных устройств и расчет частотных характеристик линейризованных схем.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Абухазим М.М.¹ Методы построения высокопроизводительных систем на основе сжатия данных [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И., Абухазим М.М. // Информационные технологии и вычислительные системы №2 2015 с. 14-19
2. Абухазим М.М. Моделирование больших систем на основе методов декомпозиции и сжатия данных [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И., Абухазим М.М. // Системы высокой доступности №4 2015 с. 77-82
3. Абухазим М.М. Методы моделирования систем на основе методов декомпозиции и компактной обработки разреженных матриц [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И., Абухазим М.М. // Информационные технологии в проектировании и производстве № 1 2016 с.3-8
4. Абухазим М.М. Сжатие данных в системах автоматизации схемотехнического проектирования на основе методов фиксированного формата [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И., Абухазим М.М. // Системы высокой доступности №4 2016 с.34-40
5. Абухазим М.М. Методы повышения эффективности процессов моделирования динамических режимов нелинейных систем [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И., Рыжов Н.Г., Абухазим М.М. // Информационные технологии №11 2017 с.796-802
6. Абухазим М.М. Повышение эффективности систем моделирования стационарного режима электронных схем. [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И., Абухазим М.М. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017 №7 с.65-78
7. Абухазим М.М. Методы повышения производительности систем моделирования больших интегральных схем на основе компактной обработки разреженных матриц [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И., Абухазим М.М. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018 №4 с.24-38

Другие статьи, материалы конференций и зарегистрированные программы:

8. Абухазим М.М. Повышение эффективности программного обеспечения распределенных систем автоматизированного проектирования. [Текст] / Анисимов В.И., Абухазим М. М., Тарасова О.Б. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2015» с. 32-33– М.: Центр

¹ Имя Абухазим М.М. читать в редакции Абу Хазим Монзер Мохаммед Салем

- информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2015.
9. Абухазим М.М. Построение высокопроизводительных систем на основе методов декомпозиции и технологии разреженных матриц. [Текст] / В.Н. Гридин, Анисимов В.И., Абухазим М. М. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2016» с. 20-22– М.: Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2016.
 10. Абухазим М.М. Построение высокопроизводительных систем автоматизированного проектирования на основе компактных методов обработки разреженных матриц. [Текст] / Гридин В.Н., Рыжов Н.Г., Анисимов В.И., Абухазим М.М. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2017» с. 28-30– М.: Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2017.
 11. Абухазим М.М. Методы повышения производительности систем дистанционного обучения [Текст] / М. М. Абухазим. Материалы XIII Международной научно- методической конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество". Том 1 с.113-115. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2017.
 12. Абухазим М.М. Повышение эффективности распределенных систем автоматизации схемотехнического проектирования. [Текст] / Рыжов Н.Г., Анисимов В.И., Абухазим М.М. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2018» с. 17-19 – М.: Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2018.
 13. Абухазим М.М. Повышение эффективности распределенных систем дистанционного обучения. [Текст] / Абухазим М.М., Анисимов В.И. Материалы XIV Международной научно- методической конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество". Том 2 с.84-86. Санкт- Петербург, СПбГЭТУ, 2018.
 14. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019613702, программа для расчета частотных характеристик методом адресации (FRQVS_ADR), дата поступления заявки: 05.03.2019, дата регистрации: 21.03.2019, авторы: Абухазим Монзер Мохаммед Салем, Анисимов Владимир Иванович, Васильев Сергей Алексеевич.