Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

**К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ**

Заведующий кафедрой КСУП

д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Ю.А. Шурыгин

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**МОДУЛЬ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ ДИАПАЗОНА**

Бакалаврская работа (дипломный проект)

по направлению 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника

Пояснительная записка

КСУП.

Студент гр. 583-1

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Т.С. Скрябина

Руководитель

к.т.н., доцент каф. КСУП

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.А. Калентьев

Томск 2017

**РЕФЕРАТ**

Отчет с., рис., табл., источников, прилож.

~~ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА, РЭС, САПР, СВЧ, РАСЧЕТ, МЕТОД, МОДУЛЬ, БИБЛИОТЕКА, ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ.~~

~~Объектами исследования являются методы и модули для расчета характеристик принципиальных схем.~~

~~Цель работы – изучить существующие модули расчета характеристик принципиальных схем СВЧ диапазона.~~

~~В процессе работы проводились исследования методов ручного и автоматизированного расчета схем, работающих в линейном режиме. В результате исследования выбрана программная библиотека, на базе которой будет разрабатываться модуль для анализа принципиальных схем СВЧ-устройств.~~

**ABSTARCT**

[реферат на иностранном языке]

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой КСУП

д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Ю.А.Шурыгин

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_г.

**ЗАДАНИЕ**

на бакалаврскую работу студенту\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ факультет \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. Тема работы: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ (утверждена приказом по вузу от \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ )

2. Срок сдачи студентом законченного проекта \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

3. Назначение и область применения системы: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

4. Требования к работе \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

5. Перечень вопросов, подлежащих разработке \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

6. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ ЗАДАНИЕ СОГЛАСОВАНО:

Консультант по нормам и требованиям ЕСКД \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Руководитель проектирования \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Ф.И.О. должность, место работы

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г. Подпись\_\_\_\_\_\_\_\_

Задание принято к исполнению

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г. Студент\_\_\_\_\_\_\_\_

подпись

Оглавление

[Введение 7](#_Toc483871309)

[1 Выбор библиотеки 8](#_Toc483871310)

[2 Описание функциональности выбранной библиотеки 9](#_Toc483871311)

[3 Подключение выбранной библиотеки к проекту .NET С# 10](#_Toc483871312)

[4 Разработка архитектуры модуля 11](#_Toc483871313)

[Заключение 12](#_Toc483871314)

[Сокращения, обозначения, термины и определения 13](#_Toc483871315)

[Список использованных источников 14](#_Toc483871316)

[Приложения 15](#_Toc483871317)

# Введение

Человечество вступило в XXI век, когда необходимо решать ряд сложных проблем. Определяющая роль в решении проблем отводится информационным технологиям. Среди информационных технологий автоматизация проектирования занимает особое место [1]. Развитие систем автоматизированного проектирования (САПР) – решение научно-технического прогресса общества. САПР опирается на прочную научно техническую базу: современные средства вычислительной техники, новые способы представления и обработки информации, создание новых численных методов решение инженерных задач и оптимизации [2].

Если говорить об устройствах сверхвысоких частот (СВЧ), то это направление, в котором системы автоматизированного проектирования развиваются очень интенсивно. Современным проектировщикам представлен большой выбор программных средств для моделирования [3]. Но на данный момент коммерческие САПР для СВЧ устройств решают широкий спектр задач, которые могут быть ненужными для пользователя. Высокая функциональность влечет высокие цены. Разработка модулей для расчета характеристик устройств с высокой точностью сложная задача, требующая много времени и затрат. В связи с этим российские производители создают свои программные обеспечения на основе существующих библиотек для анализа принципиальных схем.

# Выбор библиотеки

Большинство проблем, связанных с анализом схем, решаются в два этапа [4]. Первый этап заключается в составлении уравнений электрического равновесия в форме, позволяющей использовать законы Кирхгофа и характеристики элементов, входящих в схему. Второй этап заключается в решении этих уравнений путем применения подходящих аналитических или численных методов. До появления ЭВМ эти уравнения, как правило, решались аналитическим путем; такой подход накладывал жесткие ограничения на размер и тип схем, которые могли быть подвергнуты анализу. Большие линейные схемы (содержащие, скажем, более 50 элементов) или даже небольшие нелинейные схемы редко поддавались точному анализу. Поэтому инженеры-проектировщики полагались в основном на интуицию и усидчивость, выполняя приближенный анализ таких схем. Во всех случаях процесс анализа завершался макетированием схемы и измерениями представляющих интерес переменных параметров.

Однако даже такой подход, предполагающий макетирование, становится непригодным для анализа интегральных схем, потому что оказывается невозможным дублировать интегральную схему дискретными компонентами. Очевидно, что путем макетирования с помощью дискретных элементов невозможно точно воспроизвести паразитные эффекты и характеристики согласования элементов, входящих в интегральную схему. Невозможно также выполнить с помощью макетирования анализ допусков или анализ наихудшего случая, так как практически невозможно осуществить при макетировании изменение параметров приборов. Вместо имитации схемы посредством макетирования были разработаны САПР для разработки электронных устройств, создания микросхем и печатных плат.

В данной работе будут рассмотрены основные методы расчета, существующие коммерческие САПР и программные библиотеки, позволяющие анализировать электрические цепи.

## Методы расчета сложных электрических цепей

В случае, когда схема электрической цепи достаточно сложна и не приводится к схеме одноконтурной цепи или цепи с двумя узлами, пользуются общими методами расчета [5].

Описываемые методы применимы для цепей постоянного и переменного тока.

### Метод токов ветвей

В данном методе сначала нужно определить направления токов в цепи, а затем написать уравнения, описывающие их отношения друг с другом через законы Кирхгофа и Ома [6]. Число уравнений равно количеству неизвестных токов ветвей и определяется как

NМТВ = NB – NJ, (2.1)

где NB – число ветвей электрической цепи;

NJ – число ветвей с источниками тока.

Количество уравнений, составляемых по Закону токов Кирхгофа (ЗТК) равно

N1 = NУЗЛОВ – 1, (2.2)

где NУЗЛОВ – количество узлов электрической цепи.

Количество уравнений, составляемых по Закону напряжений Кирхгофа (ЗНК) равно

N2 = NМТВ – N1. (2.3)

При составлении уравнений по II Закону Кирхгофа следует выбирать независимые контуры, не содержащие источников тока. Как только будут получены уравнения для каждого из неизвестных токов, можно будет решить систему уравнений, рассчитав тем самым все токи, а затем и все напряжения в цепи.

Последовательность расчета:

а) проводится топологический анализ схемы:

1) обозначаются токи во всех ветвях, произвольно выбираются их положительное направление и обозначаются на схеме стрелками;

2) подсчитывается общее число узлов и определяется число независимых узлов, и обозначаются на схеме;

3) подсчитывается число независимых контуров и обозначаются на схеме дугой;

б) по ЗТК для независимых узлов и по ЗНК для независимых контуров относительно токов ветвей записывают уравнения. После привидения подобных членов они сводятся к системе линейных алгебраический уравнений (ЛАУ);

в) Решив систему уравнений относительно токов по методу Крамера находят токи во всех ветвях схемы. Если значения токов отрицательные, то действительные направления их будут противоположны первоначально выбранным направлениям.

### Метод узловых напряжений

Метод заключается в том, что на основании ЗТК определяются потенциалы в узлах электрической цепи относительно некоторого базисного узла. Эти разницы потенциалов называются узловыми напряжениями, причем положительное направление их указывается стрелкой от рассматриваемого узла к базисному.

Напряжение на какой-либо ветви равно разности узловых напряжений концов данной ветви; произведение же этого напряжения на комплексную проводимость данной ветви равно току в этой ветви. Таким образом, зная узловые напряжения в электрической цепи, можно найти токи в ветвях.

Если принять потенциал базовой ветви равным нулю, то напряжения между остальными узлами и базисным узлом будут равны также потенциалам этих узлов. Поэтому данный метод называется также методом узловых потенциалов (МУП).

Если электрическая схема содержит q узлов, то на основании первого закона Кирхгофа получается система из q-1 уравнений.

Порядок расчета:

а) обозначить все токи ветвей и их положительное направление;

б) произвольно выбрать опорный узел и пронумеровать все остальные узлы;

в) определить собственные и общие проводимости узлов, а также узловые токи, т.е. рассчитать коэффициенты в системе уравнений;

г) записывается система уравнений по ЗТК;

д) полученную систему уравнений решить относительно неизвестных потенциалов при помощи метода Крамера;

е) с помощью обобщенного закона Ома рассчитать неизвестные токи;

ж) проверить баланс мощности.

### Метод контурных токов

Метод контурных токов (МКТ) при расчете токов цепи позволяет уменьшить количество уравнений, составляемых по ЗНК:

NМКТ = N2 = NМТВ – N1 (2.4)

Ток в любой ветви цепи модно представить в виде алгебраической суммы контурных токов, протекающих по этой ветви. Выбирают и обозначают известные и неизвестные контурные токи. Известные контурные токи можно считать совпадающими с соответствующими токами источников тока. Неизвестные контурные токи определяются по ЗНК и для них составляется система уравнений метода контурных токов. Решив данную систему находятся неизвестные контурные токи. И находят токи ветвей как сумма контурных токов, протекающих в этой ветви.

Последовательность расчета:

а) топологический анализ схемы:

1) определяют число ветвей;

2) определяют число узлов;

3) посчитывают число независимых контуров;

б) все независимые контура показывают дугой со стрелкой на них, которая показывает положительное направление обхода контура. Все контуры нумеруют и контуру присваивают свой контурный ток. За положительное направление контура принимают положительное направление обхода контура;

в) по ЗНК относительно контурных токов записывают уравнения, которые после приведения подобных членов образуют системы линейных уравнений;

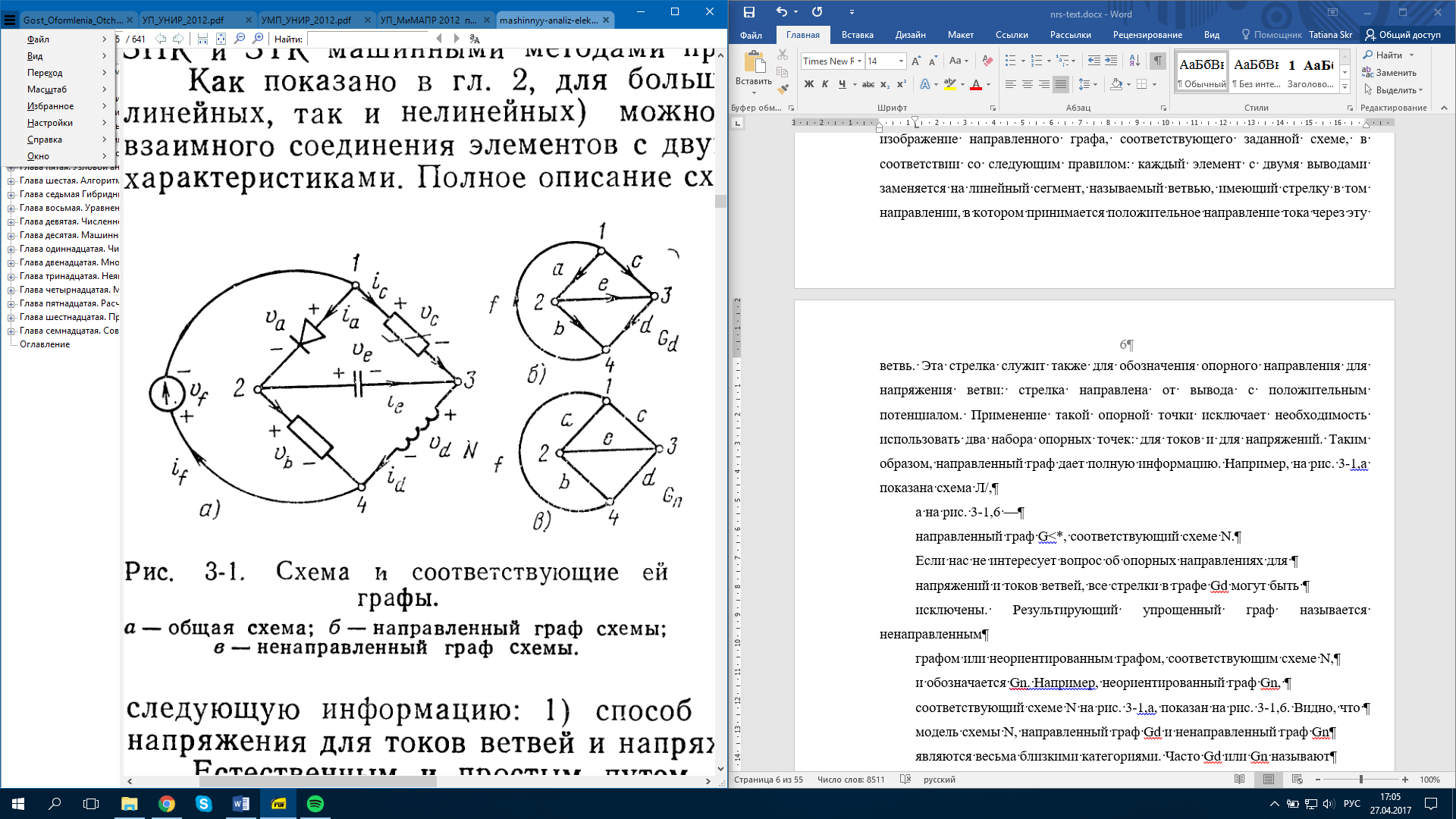
г) по правилу Крамера находят контурные токи;

д) токи в ветвях находят как алгебраическую сумму контурных токов, протекающих через данную ветвь. В алгебраической сумме контурные токи берутся с положительным знаком, если ток ветви совпадает с контурным и отрицательным, если не совпадает. Если токи ветви оказались положительными, то выбранное направление тока совпадает с истинным и наоборот.

## Описание алгоритмов в коммерческих САПР

Любая схема подчиняется трем основным законам: ЗНК, ЗТК и закону элементов (характеристики ветви) [1]. Топология схем рассматривает такие свойства сложных схем, которые связаны только с соединениями ветвей. Она является одним из направлений математики, называемой теорией графов.

Естественным и простым путем для описания информации является изображение направленного графа, соответствующего заданной схеме, в соответствии со следующим правилом: каждый элемент с двумя выводами заменяется на линейный сегмент, называемый ветвью, имеющий стрелку в том направлении, в котором принимается положительное направление тока через эту ветвь. Эта стрелка служит также для обозначения опорного направления для напряжения ветви: стрелка направлена от вывода с положительным потенциалом. Применение такой опорной точки исключает необходимость использовать два набора опорных точек: для токов и для напряжений. Таким образом, направленный граф дает полную информацию. Например, на Рисунок 2.1 показана схема N, а на Рисунок 2.2 – направленный граф G, соответствующий схеме N.

Рисунок . – Схема N

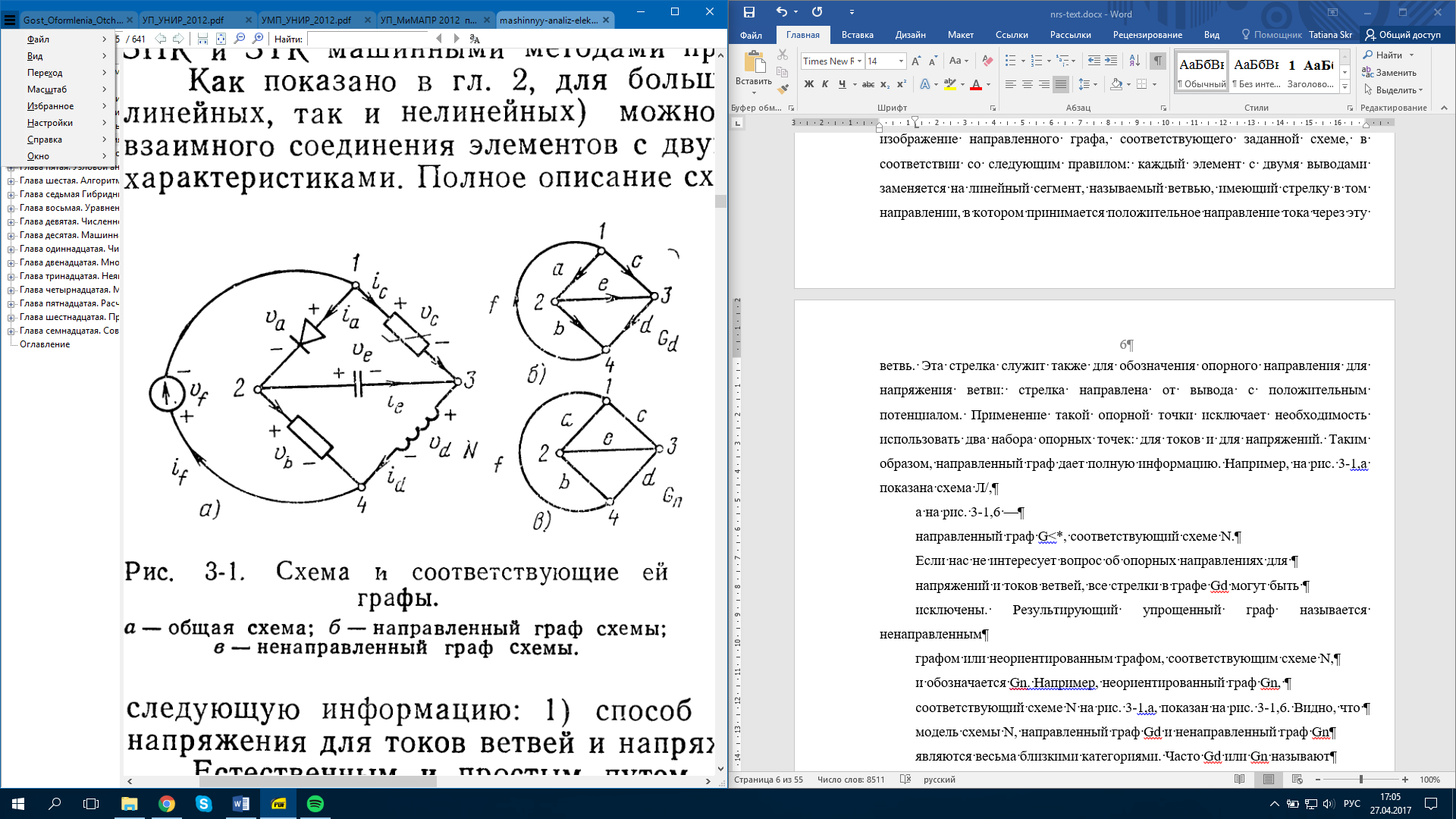


Рисунок . – Граф G

Хотя направленный граф G полностью описывается соединениями и опорными направлениями ветвей сложной схемы, эта форма выражения неудобна для записи в памяти ЭВМ. Для записи в цифровом виде наиболее удобно представление в виде матриц. Содержащаяся в направленном графе информация может быть полностью представлена матрицей, называемой матрицей инциденций.

Матрица инциденций (инцидентности) – это одна из форм представления графа, в которой указываются связи между инцидентными элементами графа (ребро(дуга) и вершина). Столбцы матрицы соответствуют ребрам, строки — вершинам.

Для того чтобы компактно выразить уравнения ЗНК в виде единственного матричного уравнения, необходимо ввести матрицу, называемую матрицей контуров (матрицей схемы), соответствующую направленному графу.

Чтобы выразить уравнения обобщенного ЗТК в виде единственного матричного уравнения, введем матрицу, называемую матрицей сечений (применительно к направленному графу). Законы Кирхгофа для тока и напряжения накладывают определенные условия на токи и напряжения ветвей в схеме. Вследствие этого лишь небольшая часть токов и напряжений ветвей независимы, а остальные переменные ветвей могут быть выражены через независимые величины.

Независимая система ЗНК и ЗТК уравнений для любого схемного графа может быть получена автоматически с помощью ЭВМ в виде топологических матриц. Результирующие уравнения относятся только к соединениям ветвей в схеме и содержат удвоенное количество переменных относительно количества независимых уравнений. Остальные уравнения можно получить из характеристик элементов. В этой работе рассматриваются только линейные схемы, содержащие RLC-элементы, независимые источники напряжения или тока и управляемые напряжением источники тока.

Для анализа линейных электрических цепей в САПР используют модифицированный МУП. Были рассмотрены следующие САПР: Microwave Office [7] (National Instruments Applied Wave Research (NI AWR), США) и Advanced Design System [8] (Keysight Technologies, США).

Идея модифицированного МУП заключается в разбиении элементов цепи (ветвей) на группы [9]:

1. ветви, которые можно описать через проводимости (ток через них не будет определен);
2. ветви, которые нельзя описать через проводимости, либо те элементы, ток в которых необходимо определить;
3. ветви независимых источников тока.

В результате решения будут найдены напряжения узлов Un и токи ветвей второй группы I2. Напряжение ветвей можно определить позже по уравнении связи напряжений ветвей и узлов Ub = At∙Un, а токи ветвей первой группы – на основании компонентных уравнений I1 = Y1∙U1. При расчете во временной области начальные токи в катушках и напряжения на конденсаторах учитываются с помощью эквивалентных источников, следующих из преобразования Лапласа.

Матричная форма уравнения модифицированного метода узловых потенциалов имеет вид:

(2.5)

YR – сокращенная подматрица узловых проводимостей, не учитывающая управляемые током элементы, G – подвектор независимых источников тока, подматрица B содержит частные производные от полученных по закону Кирхгофа для токов уравнений по дополнительным переменным. Вольтамперные связи, дифференцированные по дополнительным переменным, представлены подматрицами C и D. Подвектор F содержит вклад реактивных элементов в полный вектор независимых источников тока. Реактивные элементы рассматриваются только во временной области с учетом их конечно-разностного представления.

Таким образом, модифицированная узловая система представляет собой обычную узловую матрицу, построенную из ветвей первой группы, дополненную по принципу модифицированных табличных уравнений уравнениями ветвей второй группы. Вектор свободных членов соответственно представляет собой вектор эквивалентных узловых источников тока, дополненный источниками напряжениями ветвей второй группы. Вектор неизвестных содержит узловые напряжения и токи ветвей второй группы.

Реализация модифицированного метода узловых потенциалов достаточно проста и состоит в анализе признака ветви и внесении определенных коэффициентов либо в узловую матрицу, либо в ее дополнение. Источники тока вносятся в первую часть вектора свободных членов, а источники напряжения – во вторую.

В Microwave Office интегрированы библиотеки HSPICE (Synopsys), APLAC (NI AWR) и Spectre (Cadence). В Advanced Design System за линейный анализ отвечает элемент линейного моделирования – W2306EP Linear Simulator.

## Сравнение существующих библиотек

В ходе исследовательской работы были рассмотрены следующие симуляторы электронных схем: SPICE, SIMetrix/SIMPLIS, Ngspice, LTspice, TINA TI, Qucs, HSPICE. Ниже приведены их описания.

**SPICE** (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. Является мощной программой, используемой в разработке как интегральных схем, так и печатных плат для проверки целостности схемы и для анализа её поведения [10].

SPICE был разработан в Electronics Research Laboratory в Калифорнийском университете в Беркли Лоуренсом Нагелем. SPICE стала индустриальным стандартом симуляции электрических схем. SPICE послужил основой для разработки множества других программ симуляции схем, как в академической, так и в промышленной среде. Первая коммерческая версия — ISPICE, (National CSS). Наиболее выдающиеся коммерческие версии SPICE: HSPICE (изначально Meta Software, ныне Synopsys) и PSPICE (ныне Cadence Design Systems). Академические версии программы: XSPICE (Georgia Tech, с поддержкой смешанных аналого-цифровых моделей) и Cider (ранее CODECS, UC Berkeley и Oregon State Univ.; с поддержкой полупроводниковых устройств). Индустрия проектирования интегральных схем достаточно рано начала пользоваться SPICE, и, до развития коммерческих реализаций, многие компании-разработчики микросхем имели собственные версии SPICE. В настоящее время крупные производители микросхем развивают собственные программы симулирования на базе SPICE. Например, ADICE у компании Analog Devices, LTspice у Linear Technology, Mica у Freescale Semiconductor, TISPICE у Texas Instruments.

Впервые SPICE1 был представлен на конференции в 1973. Программа была написана на языке FORTRAN и использовала анализ цепи методом узловых потенциалов для построения уравнений схемы. Метод узловых потенциалов имел ограничения в работе с индуктивностями, источниками переменного напряжения и с различными вариантами управляемых генераторов тока и напряжения. В SPICE1 было доступно небольшое количество элементов, программа использовала анализ переходных процессов (transient analysis) с фиксированным шагом по времени. Популярность пришла ко второй версии программы, SPICE2, в 1975 году. Она тоже была написана на FORTRAN, но имела больше элементов, позволяла изменять шаг по времени при анализе переходных процессов, уравнения цепей формулировались при помощи модифицированного метода узловых потенциалов (modified nodal analysis), устраняя тем самым ограничения метода узловых потенциалов. Последняя версия SPICE, написанная на языке FORTRAN, - 2G.6 (1983 год). Следующую версию, SPICE3 разработал Томас Кворлс (Thomas Quarles) в 1989. Она написана на языке Си, использует тот же формат данных об электрических цепях (netlist) и поддерживает визуализацию в среде X Window System.

В 2011 году появление SPICE было отнесено к IEEE Milestone, было отмечено, что SPICE и его производные стали неотъемлемой частью разработки практически любой интегральной схемы.

SPICE стал популярен, поскольку поддерживал анализ и содержал модели, необходимые для разработки интегральных схем того времени, и при этом был достаточно быстрым для практического использования. Предшественники SPICE часто имели лишь одно предназначение, например, BIAS позволял рассчитывать режимы биполярных транзисторов; SLIC производил анализ малых сигналов. SPICE комбинировал в себе несколько режимов анализа и достаточно обширную библиотеку моделей устройств.

SPICE2 включает в себя:

- AC анализ (анализ по переменному току);

- DC анализ (анализ по постоянному току) для слабых сигналов;

- анализ DC transfer curve;

- анализ шумов;

- анализ передаточной функции (входное и выходное усиление малых сигналов и вычисление импеданса);

- анализ переходных процессов.

Все SPICE симуляторы работают с текстовым файлом списка соединений (netlist). Список соединений сдержит перечень схемных элементов, узлов, с которыми эти элементы связаны, определения моделей и различные SPICE директивы.

Далее представлено очень краткое описание SPICE языка:

\* КОММЕНТАРИЙ

[ТИП\_ИМЯ\_КОМПОНЕНТА] [УЗЕЛ1] .. [УЗЕЛ\_N] [ПАРАМЕТР\_1] ... [ПАРАМЕТР\_N]

.END ставится в конце файла

Типы компонентов:

Rxx resistor резистор

Lxx inductor катушка индуктивности

Cxx capacitor конденсатор

Vxx voltage source источник напряжения

Ixx current source источник тока

Exx voltage controlled voltage source

Hxx current controlled voltage source

Fxx current controlled current source

Gxx voltage controlled current source

Dxx diode диод

Jxx junction FET JFET транзистор

Mxx MOSFET МОС транзистор

Bxx GaAsFET транзистор на арсениде галлия GaAs

Qxx BJT биполярный транзистор

**SIMetrix/SIMPLIS –** уникальный симулятор, созданный для высокоскоростного анализа линейных и смешанных цепей [11].

Приложение SIMPLIS (аббревиатура от «SIMulation for Piecewise LInear System») было создано с целью быстрого моделирования источников питания и импульсных стабилизаторов, а также исследования ключевых схем преобразователей напряжения. Оно также, как и программа SPICE, функционирует на уровне компонентов радиосхемы, однако анализы переходных процессов выполняет в 10-50 раз быстрее. Подобной скорости моделирования модуль SIMPLIS достигает благодаря применению кусочно-линейной аппроксимации взамен решения систем нелинейных уравнений, используемых в программе SPICE. Приложение выполняет следующие виды анализов: переходных процессов, ФЧХ/АЧХ с замкнутой петлей авторегулирования и в рабочей точке. Последний анализ представляет собой ускоренный расчет установившегося режима работы импульсного блока питания при постоянных нагрузке и питании. Для особо сложных в плане симуляции случаев предусмотрен еще один режим анализа – Multi-Tone AC, являющийся подобием двухчастотного метода определения интермодуляционных искажений. Кроме того, в программе имеется функция автоматического преобразования SPICE-моделей в модели формата SIMPLIS.

Вторая программа SIMetrix является полноценным симулятором аналогово-цифровых схем. В ее основе лежат два распространенных продукта – XSPICE и SPIСE. Приложение имеет схемный редактор, симулятор и графический постпроцессор. В качестве основного метода итерации применяется решение Ньютона-Рэфсона, обеспечивающего быстроту расчетов режимов переходных процессов и по постоянному току. Для особо «каверзных» схем имеется алгоритм псевдопереходного анализа с изоляцией/фиксацией не вычисляемых узловых потенциалов и адаптируемым шагом итерации. Программа SIMetrix выполняет поддержку моделей элементов спецификации MOS9, BSIM3/4, Mextram, VBIC и совместима с файлами HSPICE. Кроме того, приложение имеет пробник Бодэ и калькулятор КПД, а также поддерживает создание произвольного логического блока, имитирующего работу цифрового устройства.

Программы, входящие в данный комплект, были разработаны благодаря усилиям двух компаний-партнеров – SIMetrix Technologies (Великобритания, графство Беркшир, город Тэтчем) и SIMPLIS Technologies (США, штат Орегон, город Портленд).

**Ngspice** – симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом, обеспечивающий моделирование в режиме смешанных сигналов и на смешанном уровне [12]. Является расширением Spice3f5, включившим в себя код проекта Cider, обеспечивающий моделирование на смешанном уровне, и проекта XSPICE, обеспечивающий моделирование смешанных сигналов. Является мощной программой, используемой в разработке как интегральных схем, так и печатных плат для проверки целостности схемы и для анализа её поведения.

**LTspice** (он же SwitcherCAD) представляет собой универсальную среду для проектирования и создания электрических схем с интегрированным симулятором смешанного моделирования [11]. Программа позволяет быстро менять компоненты и параметры электронных схем, испытывать работоспособность новых вариантов, находить оптимальные решения. Возможна загрузка списка соединений, сгенерированного другими инструментами для рисования схем или созданного вручную. От аналогичных программ (Microcap, OrCAD) рассматриваемое ПО отличается малым объемом необходимого дискового пространства и более высокой скоростью моделирования процессов.

LTspice содержит полную библиотеку компонентов компании Linear Technology Corporation (пассивные элементы и интегральные схемы, включая редкие модели импульсных контроллеров и регуляторов). Поскольку программа использует стандартные SPICE-модели электронных деталей, к имеющейся базе можно добавлять библиотеки сторонних производителей, а также создавать свои собственные модели.

**TINA-TI** представляет собой обычный SPICE-симулятор с простым, интуитивно понятным графическим интерфейсом, позволяющим освоить программу в кратчайшие сроки [11]. Все компоненты, представленные в TINA-TI, распределены по шести группам: основные пассивные радиодетали, ключи, полупроводники, измерительные приборы, макромодели сложных устройств и источники. Также данная программа включает в себя несколько десятков разнообразных примеров.

TINA-TI предоставляет широкие возможности по рисованию и редактированию электронных схем. Имеются следующие виды анализов: по постоянному и переменному току (сюда входит: вычисление узловых напряжений, создание таблицы результатов, построение переходных характеристик и температурный анализ), переходных процессов, шумов, преобразование Фурье и некоторые другие. В зависимости от вида выполняемого анализа программа генерирует результаты в виде графиков или таблиц. В программе TINA-TI также доступны возможности тестирования и измерения сигналов. Для этого существуют следующие виртуальные приборы: осциллограф, анализатор сигналов, цифровой тестер (с измерителем частоты), генератор функций и записывающее устройство. Виртуальные приборы программного комплекса максимально приближены по использованию к реальным устройствам. «Подключить» их можно к любой точке рассматриваемой схемы. Вся информация, снятая виртуальными приборами, может сохраняться в памяти компьютера.

**Qucs** – свободная программа, предназначенная для моделирования электронных цепей. Распространяется по лицензии GPL. Позволяет моделировать электронную аппаратуру в режиме малого и большого сигнала, а также шумовые характеристики. Пользовательский интерфейс — графический. Цифровая аппаратура моделируется с использованием VHDL и/или Verilog [13].

Отличительной особенность данного симулятора является расширенные функции для моделирования схем СВЧ-устройств: моделирование S-параметров, специальные модели СВЧ-компонентов и постпроцессор с расширенными функциями анализа комплексных сопротивлений в частотной области. По возможностям анализа СВЧ-устройств Qucs приближается к таким проеприетарным аналогам как AWR MicrowaveOffice. Но симулятор Qucsator несовместим со SPICE и поддерживает SPICE только через слой совместимости, что значительно осложняет использование существующих библиотек моделей электронных компонентов. Несмотря на отличные характеристики движка Qucsator для моделирования СВЧ-схем в частотной, во временной области имеются многочисленные ошибки.

**HSPICE** – система моделирования, а также сами модели, основанные на SPICE [14]. Изначально был создан Ashawna Hailey, позднее был куплен фирмой Synopsys. В настоящее время HSPICE является стандартом де-факто ("золотой" стандарт индустрии) для производителей микросхем, т.к. обеспечивает максимально правдоподобное моделирование узлов на транзисторном уровне. В настоящее время пакет сильно расширен за счет внедрения возможностей анализа в частотной области, анализа кабелей и полосковых линий, а также возможности импорта результата моделирования в других САПР (например, импорт S-параметров, с последующим обратным преобразованием Фурье). Стоит отметить, что эти возможности уже не могут обеспечить точности, которую дают специализированные САПР (например, HFSS (AnSys), или ADS (Agilent Techologies) для анализа кабелей, или печатных проводников), но позволяют качественно оценить работу системы.

В таблице 2.1 представлено сравнение существующих библиотек для анализа принципиальных схем СВЧ диапазона.

Таблица . – Сравнительная таблица

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Библиотека | Лицензия | Анализ |
| SPICE | BSD | По переменному току, по постоянному току, передаточной функции, шумов, переходных процессов |
| SIMetrix/ SIMPLIS | платная | Переходного процесса, периодический анализ рабочих точек, по переменному току |
| Ngspice | BSD | Нелинейный по постоянному току, нелинейный переходных процессов, линейный по переменному току |
| LTSpice | freeware | Переходных процессов, по переменному току, шумов и по постоянному току, преобразование Фурье |
| TINA | freeware | По переменному току, переходных процессов, по постоянному току, преобразование Фурье |
| qucsator | GPL | По постоянному току, по переменному току, гармонический баланс, по цифровому сигналу, переходных процессов, S-параметров, развертка по параметру, оптимизация |
| HSPICE | платная  от $1000 в год (учебная версия) | По переменному току, по постоянному току, по цифровому сигналу, переходных процессов, спектральный, линейный, статистический, Монте-Карло, оптимизация |

Информация по типам лицензий представлен в приложении А.

Сделав обзор существующих библиотек можно сделать следующие выводы:

- возможности бесплатных библиотеки не сильно уступают платным;

- qucsator имеет расширенные функции для анализа СВЧ-устройств. Однако он несовместим со SPICE и поддерживает SPICE только через конвертер, что значительно осложняет использование существующих библиотек моделей электронных компонентов;

- библиотеки SPICE и Ngspice являются хорошим вариантом для разработки своего программного продукта.

# Описание функциональности выбранной библиотеки

[входные-выходные данные библиотеки, описания импортируемых методов]

# Подключение выбранной библиотеки к проекту .NET С#

[кратко описать варианты подключения (c++ managed, pinvoke), подробнее про pinvoke и маршалинг]

# Разработка архитектуры модуля

[uml-диаграммы]

# Заключение

# Сокращения, обозначения, термины и определения

# Список использованных источников

1. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов / И. П. Норенков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2009. – 430 с.
2. Трифоненко И. М., Горячев Н. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. Обзор систем сквозного проектирования печатных плат радиоэлектронных средств [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – 2012. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sistem-skvoznogo-proektirovaniya-pechatnyh-plat-radioelektronnyh-sredstv> (дата обращения 03.05.17)
3. Сальникова Н. А., Астафурова О. А. Методы моделирования в системах автоматизированного проектирования СВЧ-устройств [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – 2014. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/metody-modelirovaniya-v-sistemah-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-svch-ustroystv> (дата обращения 03.05.17)
4. Leon O. Chua, Pen-Min Lin. Computer-aided analysis of electronic circuits / Перевод с английского Е.В Виленкина, В.Н, Елисеева и др. – М.: «Энергия», 1980.
5. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учебное пособие / Г.И. Атабеков. – Спб.: Издательство «Лань», 2009. – 592 с.
6. Решение ТОЭ ОТЦ ТЛЭЦ Электротехника [Электронный ресурс]. – URL: <http://rgr-toe.ru> (дата обращения 23.04.17)
7. Getting Started Guide. Chapter 4. MWO: Using the Linear Simulator [Электронный ресурс]. – URL: [awrcorp.com/download/faq/english/docs/Getting\_Started/ch04.html](https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Getting_Started/ch04.html) (дата обращения 23.04.17)
8. Circuit Simulation [Электронный ресурс]. – URL: [literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/ads2003c/cktsim/index.html](http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/ads2003c/cktsim/index.html) (дата обращения 23.04.17)
9. Черкашин М.В. Модели и методы анализа проектных решений: учеб. пособие / М.В. Черкашин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 296 с.
10. SPICE (симулятор электронных схем) [Электронный ресурс]. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/SPICE> (дата обращения 27.04.17)
11. Сайт ПАЯЛЬНИК [Электронный ресурс]. – URL: <http://cxem.net/> (дата обращения 27.04.17)
12. Ngspice – Википедия [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ngspice> (дата обращения 27.04.17)
13. Qucs – Википедия [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Qucs> (дата обращения 04.05.17)
14. HSPICE [Электронный ресурс]. – URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1700378> (дата обращения 04.05.17)

# Приложение А

(справочное)

**Описание типов лицензий**

Лицензия **BSD** (англ. BSD license, Berkeley Software Distribution license – Программная лицензия университета Беркли) – это лицензионное соглашение, впервые применённое для распространения UNIX-подобных операционных систем BSD. Права на исходный дистрибутив BSD официально принадлежат «попечителям университета Калифорнии» (англ. Regents of the University of California) – управляющему органу университета Калифорнии.

По сравнению с другими распространёнными лицензиями на свободное программное обеспечение (например, GNU General Public License) лицензия BSD налагает меньше ограничений на пользователя. Лицензия BSD допускает проприетарное коммерческое использование ПО. Для ПО, выпущенного под этой лицензией, допускается встраивание в проприетарные коммерческие продукты. Работы, основанные на таком ПО, даже могут распространяться под проприетарными лицензиями (но всё же обязаны соответствовать требованиям лицензии). Можно применять к распространяемому продукту одновременно лицензию BSD и какую-то другую.

Бесплатное программное обеспечение (англ. **freeware**) – программное обеспечение, лицензионное соглашение которого не требует каких-либо выплат правообладателю. Бесплатное программное обеспечение обычно распространяется в бинарном виде, без исходных кодов и является проприетарным программным обеспечением.

GNU **General Public License** – лицензия на свободное программное обеспечение, созданная в рамках проекта GNU в 1988 г., по которой автор передаёт программное обеспечение в общественную собственность. Цель GNU GPL – предоставить пользователю права копировать, модифицировать и распространять (в том числе на коммерческой основе) программы, а также гарантировать, что и пользователи всех производных программ получат вышеперечисленные права. GNU GPL не позволяет включать программу в проприетарное ПО.

GPL предоставляет получателям компьютерных программ следующие права, или «свободы»:

- свободу запуска программы с любой целью;

- свободу изучения того, как программа работает, и её модификации (предварительным условием для этого является доступ к исходному коду);

- свободу распространения копий как исходного, так и исполняемого кода;

- свободу улучшения программы, и выпуска улучшений в публичный доступ (предварительным условием для этого является доступ к исходному коду).

В общем случае распространитель программы, полученной на условиях GPL, либо программы, основанной на таковой, обязан предоставить получателю возможность получить соответствующий исходный код.