

**ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»**

Факультет компьютерных наук

Департамент программной инженерии

**СОГЛАСОВАНО**

Доцент департамента математики на  
факультете экономических наук, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ В. Л. Чернышев  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

**УТВЕРЖДАЮ**

Академический руководитель  
образовательной программы  
«Программная инженерия», профессор  
департамента программной  
инженерии, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_ В.В. Шилов  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

**Программная реализация алгоритма построения правил квантования  
для метрических графов**

**Пояснительная записка**

**ЛИСТ УТВЕРЖДЕНИЯ  
RU.17701729.503390-01 81 01-1-ЛУ**

Инв. № подл.	Подп. и дата
RU.17701729.5033 90-01 81 01-1-ЛУ	
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	

Исполнитель  
студент группы БПИ152  
\_\_\_\_\_/Соловьев Е.А./  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

2016

УТВЕРЖДЕНО

RU.17701729.503390-01 81 01-1-ЛУ

**Программная реализация алгоритма построения правил квантования для  
метрических графов**

Пояснительная записка  
RU.17701729.503390-01 81 01-1

**Листов 41**

<i>Инв. № подл.</i>	<i>Подп. и дата</i>	<i>Взам. Инв. №</i>	<i>Инв. № дубл.</i>	<i>Подп. и дата</i>
RU.17701729.5033 90-01 81 01-1				

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение .....	5
1.1. Наименование программы .....	5
1.2. Документы, на основании которых ведется разработка .....	5
2. Назначение и область применения .....	6
2.1. Назначение программы .....	6
2.1.1. Функциональное назначение .....	6
2.1.2. Эксплуатационное назначение .....	6
2.2. Краткая характеристика области применения .....	6
3. Технические характеристики .....	7
3.1. Постановка задачи на разработку программы .....	7
3.2. Описание алгоритма и функционирования программы.....	7
3.2.1. Описание алгоритма построения правил квантования для метрических графов.....	7
3.2.2. Описание алгоритма поиска компонент слабой связности для метрических графов.....	10
3.3. Описание и обоснование выбора состава технических и программных средств .....	11
3.3.1. Описание выбора состава технических средств .....	11
3.3.2. Обоснование выбора состава технических средств .....	12
3.3.3. Описание выбора состава программных средств .....	12
3.3.4. Обоснование выбора состава программных средств .....	12
3.4. Описание и обоснование выбора метода организации входных и выходных данных .....	12
3.4.1. Описание метода организации входных и выходных данных .....	12
3.4.2. Обоснование выбора метода организации входных и выходных данных..	13
4. Ожидаемые технико-экономические показатели .....	14
4.1. Предполагаемая востребованность .....	14
4.2. Экономические преимущества разработки по сравнению с аналогами.....	14
5. Список использованных источников .....	15
6. Приложения .....	16

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

Приложение 1. Используемые понятия и определения .....	16
Приложение 2. Описание формата .gr.....	18
Приложение 3. Описание и функциональное назначение классов.....	20
Приложение 4. Описание и функциональное назначение полей, методов и свойств .....	20

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## 1. ВВЕДЕНИЕ

### 1.1. Наименование программы

Наименование программы – «Программа для построения правил квантования для метрических графов» («Program Implementation of the Algorithm for Quantization Rules Constructing for Metric Graphs»).

Используемое краткое наименование – Quantum.

### 1.2. Документы, на основании которых ведется разработка

1) Приказ Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" «Об утверждении тем, руководителей курсовых работ студентов образовательной программы Программная инженерия факультета компьютерных наук» от 11.12.15 № 6.18.1-02/1112-19.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## 2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

### 2.1. Назначение программы

#### 2.1.1. Функциональное назначение

Программа предназначена для реализации алгоритма построения правил квантования метрических графов (обобщающих известные правила квантования Бора–Зоммерфельда), описанного в статье В. Л. Чернышева и А. И. Шафаревича «Квазиклассический спектр оператора Шрёдингера на геометрическом графе» [1].

#### 2.1.2. Эксплуатационное назначение

Программа предназначена для нахождения правил квантования для заданных геометрических графов. Она позволяет решать задачи, возникающие как при составлении теоретических моделей, так и при обработке экспериментально полученных данных, например, при изучении стационарных состояний электронов в молекуле.

### 2.2. Краткая характеристика области применения

Одной из типичных задач математической физики является нахождение собственных значений (спектра) и собственных функций некоторых дифференциальных операторов.

В квантовой механике для нахождения квазиклассических спектральных серий оператора Шрёдингера могут использоваться правила квантования Бора–Зоммерфельда. Обычно они представляют собой равенство некоторых выражений (чаще всего это некоторые интегралы), зависящих от искомых собственных значений, целым неотрицательным числам, что позволяет находить спектр.

Уравнения математической физики на геометрических графах (одномерных клеточных комплексах) и других гибридных пространствах активно изучаются в последние тридцать лет.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

### 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### 3.1. Постановка задачи на разработку программы

Программа должна обеспечивать возможность выполнения перечисленных ниже функций:

- 1) Выбор файла с описанием графа для открытия или редактирования.
- 2) Выбор файла, в который будет записано описание графа.
- 3) Задание метрического графа с помощью графического интерфейса и сохранение его описания в файл.
- 4) Анализ графа на корректность (связность и непрерывность функции).
- 5) Получение результата в виде текста, описывающего правила квантования данного графа.

#### 3.2. Описание алгоритма и функционирования программы

##### 3.2.1. Описание алгоритма построения правил квантования для метрических графов

Входные данные: геометрический граф с заданной на нём функцией  $V(x)$ , параметр  $\lambda$  – фиксированное действительное число.

Алгоритм может быть применим к графу в случае, когда тот является слабо-связным (иными словами, когда он состоит из одной слабо-связной компоненты, совпадающей с ним), а заданная на нём функция является непрерывной. Перед началом выполнения основной части алгоритма необходимо:

1. Проверить граф на слабую связность. Для этого достаточно найти все его компоненты слабой связности. Если граф состоит из одной такой компоненты, то он совпадает с этой компонентой и является слабо-связной.
2. Проверить функцию на графе на непрерывность в вершинах. Для этого необходимо просмотреть все вершины степени больше единицы и рассмотреть

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

функции  $V_j$  на инцидентных каждой такой вершине рёбрах. Если значения этих функций совпадают в точках, соответствующих общей вершине, то функция является непрерывной в этой вершине.

Основная часть алгоритма состоит из пяти шагов.

1. Найти и отметить на графе точки (новые вершины), где  $V(x)=\lambda$ . Это могут быть как вершины исходного графа, так и точки на рёбрах графа – в таком случае данное ребро делится отмеченными на нём точками на несколько новых ребер – их количество больше количества новых точек на единицу. Для того, чтобы найти корни данного уравнения, необходимо найти их для каждого ребра отдельно с помощью соответствующих команд системы компьютерной алгебры Maple. Новые вершины графа назовём вершинами поворота (или лямбда-вершинами) и будем считать их отличными от вершин исходного графа.

2. Удалить из графа участки, где  $V(x)>\lambda$  (деформация графа). Для этого достаточно пройтись по рёбрам изменённого графа: на каждом из них функция  $(\lambda - V(x))$  будет иметь постоянный знак. Достаточно лишь узнать знак функции в одной из точек внутри ребра, например, в его середине – это можно сделать с помощью функции evalf в Maple.

3. Изменить ориентацию некоторых рёбер: все вершины степени один (висячие вершины) считаются начальными точками для рёбер, примыкающим к ним. Для остальных рёбер ориентация не меняется.

4. После выполнения шагов 1-2 (деформации графа) исходный граф мог перестать быть слабо-связным. В таком случае достаточно применить шаги 4 и 5 данного алгоритма к каждой из компонент связности в отдельности (не рассматривая при этом компоненты связности деформированного графа, состоящие из одной вершины или двух вершин поворота). Выписать однородную систему линейных алгебраических уравнений на решения на рёбрах. Для решения поставленной задачи достаточно выписать матрицу

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



коэффициентов у переменных. Переменных, равно как и уравнений, будет  $2n-k$ , где  $n$  – число рёбер на компоненте связности,  $k$  – число висячих вершин (на каждом ребре существует решение, определяемое двумя переменными. В случае, если одна исходная или конечная вершина ребра имеет степень один, в СЛАУ будет включена только одна переменная, потому что вторая выражается через первую). Необходимо пройти по всем вершинам графа и выписать соответствующие им уравнения. Если рассматриваемая вершина есть вершина исходного графа степени больше единицы, все соседи которой – вершины исходного графа степени больше единицы (такие вершины также называются внутренними), для неё выписывается  $i-1$  уравнение, где  $i$  – степень вершины. Отдельно выписываются уравнения для вершин исходного графа степени больше единицы, соседствующих с вершинами степени один. Разница в выписывании уравнений состоит в коэффициентах при соответствующих переменных.

Существуют два графа, к которым алгоритм выписывания СЛАУ неприменим в силу их простоты, а именно две вершины исходного графа, связанные одним ребром, и лямбда-вершина, соединённая одним ребром с вершиной исходного графа. Они разобраны отдельно, и для них соответствующие правила квантования выписываются сразу.

5. Полученная СЛАУ должна иметь нетривиальные (т.е. ненулевые) решения. Для этого необходимо воспользоваться известной теоремой линейной алгебры и приравнять определитель матрицы коэффициентов нулю. Равенство нулю этого определителя и даёт правило квантования для данной компоненты связности. Элементы рассматриваемой матрицы – некоторые переменные выражения, зависящие от некоторого числа символьных переменных, так что вычисление определителя можно выполнить с помощью команды `Determinant` системы Maple, а к результату целесообразно применить команду `simplify` для его упрощения.

Говоря о вычислительной сложности данного алгоритма, стоит отметить, что шаги 2-4 алгоритма выполняются за время  $O(E)$ , где  $E$  – число рёбер графа. Время

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

работы шагов 1 и 5 алгоритма с трудом поддаётся асимптотической оценке, поскольку сложность вычислений напрямую зависит от заданной на графе функции, а также от характера матрицы, получаемой на шаге 4 (также стоит отметить, что асимптотическое время вычисления определителя матрицы с переменными коэффициентами системой Maple неизвестно).

### 3.2.2. Описание алгоритма поиска компонент слабой связности для метрических графов

Компоненты слабой связности графа можно найти, применив алгоритм обхода графа в глубину (DFS). Необходимо пройти по всем вершинам графа. Поместим первую вершину графа в первую компоненту связности. Запустим обход в глубину от этой вершины. Все вершины, через которые прошёл алгоритм поиска в глубину, добавим в ту же компоненту связности. Рассмотрим некоторую необработанную вершину (если она существует). Поместим её во вторую компоненту связности и запустим поиск в глубину от неё. Продолжаем делать это до того момента, пока в исходном графе не закончатся вершины (это, очевидно, произойдёт, поскольку на каждом шаге (итерации) обрабатывается хотя бы одна вершина, а их в графе конечное число).

Схема алгоритма поиска в глубину. Пусть  $Dfs(v)$  – процедура обхода в глубину для вершины графа  $v$ . Пройдём по всем вершинам графа. Если вершина  $v$  не обработана, выполняем для неё  $Dfs(v)$ .

Процедура  $Dfs(v)$ :

1. Помечаем вершину  $v$  обработанной.
2. Для всех вершин  $v'$ , соединённых ребром (направление не учитывается) с  $v$ , выполним  $Dfs(v')$ .

Для хранения ссылок на обработанные вершины в языке C# можно использовать коллекцию – список  $List<Vertex>$ , где  $Vertex$  – тип вершины. Для

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

хранения полученных компонент связности можно использовать коллекцию – список списков  $List<List<Vertex>>$  (достаточно хранить лишь вершины, поскольку рёбра для каждой компоненты связности могут быть получены по исходном графу).

Асимптотическая сложность обхода графа в глубину равна  $O(V+E)$ , где  $V$  – число вершин графа,  $E$  – число рёбер.

Асимптотическая сложность поиска компонент слабой связности в графе с помощью обхода графа в глубину –  $O(V+E)$ .

### **3.3. Описание и обоснование выбора состава технических и программных средств**

#### **3.3.1. Описание выбора состава технических средств**

Для стабильной работы программы необходим персональный компьютер со следующим минимальным набором характеристик:

- 1) Процессор Pentium (или совместимый) с частотой 1 ГГц или более быстрый (рекомендуется не менее 1.5 ГГц).
- 2) Не менее 1 ГБ оперативной памяти (рекомендуется не менее 2 ГБ) для компьютера с 32-битным процессором и не менее 2 ГБ оперативной памяти (рекомендуется не менее 4 ГБ) для компьютера с 64-битным процессором.
- 3) Не менее 50 МБ свободного места на жёстком диске.
- 4) Дисковод для CD- или DVD-дисков.
- 5) Клавиатура, мышь или совместимое указывающее устройство.
- 6) Видеокарта и монитор с поддержкой режима Super VGA и разрешением как минимум 800x600 точек.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

### **3.3.2. Обоснование выбора состава технических средств**

Выбор состава технических средств обусловлен системными требованиями системы компьютерной алгебры Maple [3] и системными требованиями операционной системы Windows 7 [2].

### **3.3.3. Описание выбора состава программных средств**

- 1) операционная система Microsoft Windows 7 и новее;
- 2) установленный Microsoft .NET Framework 4.5.2;
- 3) установленный математический пакет Maple версии 18 или 2015.

### **3.3.4. Обоснование выбора состава программных средств**

Версия 7 операционной системы Microsoft Windows выбрана как минимальная среди поддерживаемых математическим пакетом Maple.

Версия Microsoft .NET Framework 4.5.2 выбрана как поддерживающая последнюю версию и возможности языка C#, что облегчит поддержку и дальнейшую разработку программы. Эта версия поддерживается минимальной поддерживаемой версией ОС Microsoft Windows 7.

Версии Maple 18/2015 выбраны как последние (совместимые друг с другом в рамках задач, решаемых в данной работе) версии математического пакета Maple. Математический пакет Maple выбран благодаря его распространённости и удобству в использовании.

## **3.4. Описание и обоснование выбора метода организации входных и выходных данных**

### **3.4.1. Описание метода организации входных и выходных данных**

Программа представляет возможность открытия файла с расширением .gr (формат для представления графа в компьютере), а также позволяет создавать такие файлы с помощью графического интерфейса.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

Программа позволяет сохранять правила квантования в текстовый файл формата .txt.

### **3.4.2. Обоснование выбора метода организации входных и выходных данных**

Совместимость формата .gr с текстовым форматом .txt позволяет определять графы не только с помощью графического интерфейса, но и с помощью обычного текстового редактора, например, «Блокнота» Microsoft Windows. Это позволяет загружать в программу экспериментально полученные графы больших размеров, задание которых вручную с помощью мыши и клавиатуры занимает продолжительное время.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## **4. ОЖИДАЕМЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ**

### **4.1. Предполагаемая востребованность**

Разработанная программа представляет собой удобный инструмент для построения правил квантования для задаваемых графов. Работа носит преимущественно практический характер, но её результаты могут быть полезны в теоретических исследованиях в различных областях математической физики и вычислительной химии.

### **4.2. Экономические преимущества разработки по сравнению с аналогами**

В настоящее время не существует программного решения рассматриваемой задачи. Теоретическое решение (алгоритм) описано в статье [1], но из-за трудоёмких вычислений целесообразно применение его программной реализации. Разработанный программный продукт позволяет упростить и автоматизировать ту часть процесса нахождения спектра дифференциального оператора на графе, которая поддаётся алгоритмизации.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## 5. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В. Л. Чернышев Квазиклассический спектр оператора Шрёдингера на геометрическом графе / В. Л. Чернышев, А. И. Шафаревич // Матем. заметки, 82:4 (2007), 606–620.
2. Системные требования ОС Windows 7. [Электронный ресурс] // URL: <http://windows.microsoft.com/systemrequirements?4bcfd458> (Дата обращения: 15.05.2016, режим доступа: свободный).
3. Maple 2015 Installation and Licensing Guide. [Электронный ресурс] // URL: [http://www.maplesoft.com/support/install/maple2015\\_install.html#MapleInstallGuide\\_SysReq](http://www.maplesoft.com/support/install/maple2015_install.html#MapleInstallGuide_SysReq) (Дата обращения: 15.05.2016, режим доступа: свободный).
4. Единая система программной документации – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.
5. Подбельский В. В. Язык С#. Базовый курс: учеб. пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Финансы и статистика, 2013.
6. Справочник по С# [Электронный ресурс] URL: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/618ayhy6.aspx> (Дата обращения: 15.05.2016, режим доступа: свободный).
7. Maple User Manual [Электронный ресурс] URL: [http://www.maplesoft.com/documentation\\_center/maple18/UserManual.pdf](http://www.maplesoft.com/documentation_center/maple18/UserManual.pdf) (Дата обращения: 15.05.2016, режим доступа: свободный).
8. Поиск в глубину [Электронный ресурс] URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Поиск\\_в\\_глубину](https://ru.wikipedia.org/wiki/Поиск_в_глубину) (Дата обращения: 15.05.2016, режим доступа: свободный).

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## 6. ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Используемые понятия и определения

Граф (могут использоваться также понятия метрический граф, геометрический граф) – совокупность множества вершин  $V$  и множества рёбер  $E$ . Ребра имеют направления и представляют собой отрезки регулярных кривых. Ребро соединяет две вершины, и направление указывает, какая из них является начальной, а какая – конечной. Каждое ребро имеет длину, выражаемую положительным числом. Не исключаются петли – ребра, для которых начальная и конечная вершины совпадают. Не исключаются кратные рёбра – рёбра, соединяющие одни и те же пары вершин. Рассматриваются только конечные графы, то есть графы с конечным числом рёбер и вершин.

Инцидентность. Ребро  $e$  и вершина  $v$  называются инцидентными, если начальная или конечная вершина ребра  $e$  есть вершина  $v$ .

Соседние с вершиной рёбра – множество рёбер, для которых начальная или конечная вершина совпадает с некоторой наперёд заданной вершиной.

Слабая связность графа. Граф называется слабо-связным, если для любых двух его вершин существует конечная последовательность рёбер, ведущая из первой вершины во вторую, при условии, что по каждому ребру можно двигаться в любом направлении.

Подграф – граф, состоящий из подмножества вершин данного графа и рёбер, соединяющих их.

Компонента связности – максимальный по числу вершин подграф графа, являющийся слабо-связным.

Степень вершины – совокупное количество входящих и выходящих из вершины рёбер (петля считается за два ребра).

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



Висячая вершина – вершина степени один.

Функция на ребре (может использоваться также понятие потенциала) – непрерывное отображение, ставящее в соответствие каждой точке графа действительное число. Обычно обозначается  $V(x)$ . В данной работе задание функции производится кусочно: на каждом ребре  $j$  задаётся действительнoзначная функция  $V_j(x)$ , определённая на некотором интервале, принадлежащем действительной оси. Тогда значения функции для точек, лежащих на данном ребре, находятся просто как значения соответствующей функции  $V_j(x)$ . Требуется, чтобы все функции  $V_j(x)$  были гладкими на рёбрах (гладкая функция – функция, имеющая непрерывную производную на области определения). Непрерывность функции на графе в целом в данном случае означает, в дополнение к наложенному условию гладкости функций на рёбрах, то, что если какой-либо вершине инцидентно несколько рёбер, то значения соответствующих этим рёбрам функций  $V_j(x)$  в точках, соответствующих этой вершине, совпадают.

Правила квантования для метрических графов – правила, позволяющие находить собственные значения оператора Шрёдингера, определённого на графе. Они представляют собой аналоги правил квантования Бора-Зоммерфельда (применяемые в квантовой механике для нахождения квазиклассических спектральных серий), представляющие собой равенство некоторых выражений (чаще всего это некоторые интегралы), зависящих от искомым собственных значений, целым неотрицательным числам. Алгоритм построения правил квантования для метрических графов описан в статье [1]. Данная работа представляет собой себя программную реализацию этого алгоритма.

Условие трансмиссии – условие равенства нулю линейной комбинации производных функций на рёбрах, примыкающих к заданной вершине, в этой вершине.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

Условия Кирхгофа. Условия трансмиссии представляют собой условия Кирхгофа, если коэффициенты в условиях трансмиссии имеют положительный знак для выходящих из вершин рёбер, и отрицательный для входящих рёбер.

Условия трансмиссии назовём натуральными, если они имеют вид Кирхгофа, причём все коэффициенты в них равны по модулю. Если условия трансмиссии являются натуральными, рассматриваемый дифференциальный оператор на графе является самосопряжённым.

Параметр  $\phi$  – параметр, определяемый для ребра как  $\phi_j = \frac{1}{h} \int_a^b \sqrt{\lambda - V_j(x)} dx$  – здесь интеграл берётся по ребру, а  $h$  – параметр, пропорциональный постоянной Планка, формальная константа без определяемого в программе численного значения.

## Приложение 2. Описание формата .gr

Формат представления графов в компьютере .gr – формат компьютерных файлов, позволяющий представлять граф с заданной на нём функций в компьютере. Данный формат совместим с текстовым форматом .txt, то есть созданные в данной программе файлы можно редактировать с помощью текстовых редакторов, поддерживающих работу с форматом .txt (например, с помощью встроенного в операционную Microsoft Windows редактора «Блокнот»). Это удобный формат работы с входными данными программы, помимо всего прочего, открывающий возможность потенциального построения системы без графического интерфейса, строящей правила квантования для больших графов, полученных экспериментальным путём.

Первой строкой файла формата .gr должна быть строка «1» (без кавычек). Это означает, что хранимый в файле граф может быть отображён графически с помощью разработанной программы. Второй строкой должна быть строка “#”. Третья строка файла – размеры рабочей области через пробел, то есть строка вида «<X> <Y>», где

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

$\langle X \rangle$  - длина (в пикселях) рабочей области,  $\langle Y \rangle$  - её высота.  $\langle X \rangle$  и  $\langle Y \rangle$  - положительные целые числа. Четвертая строка файла формата .gr - строка “#”.

Далее идёт описание вершин графа. Информация о каждой вершине должна быть размещена в отдельной строке с координатами центра данной вершины в пикселях через пробел, то есть в строке вида « $\langle X \rangle \langle Y \rangle$ », где  $\langle X \rangle$  - X-координата центра вершины,  $\langle Y \rangle$  - Y-координата центра вершины. Здесь начало координат – левый верхний угол рабочей области, положительное направление оси X совпадает с направлением движения вправо, положительное направление оси Y совпадает с направлением движения вниз, то есть координаты должны иметь неотрицательные целые значения, чтобы вершина была отображена в программе. Координаты должны представлять собой целые числа. Блок описания вершин завершается строкой “#”.

Оставшиеся строки файла описывают рёбра графа. Каждое ребро представляется отдельной строкой вида « $\langle V1 \rangle \langle V2 \rangle \langle L \rangle \langle VX \rangle \langle A \rangle \langle B \rangle$ ». Здесь  $\langle V1 \rangle$  и  $\langle V2 \rangle$  – номера исходной и конечной вершин ребра соответственно: это целые числа, лежащие в диапазоне от 1 до количества вершин, определённых в предыдущем блоке,  $\langle L \rangle$  - длина ребра, представленная положительным действительным числом (для разделения целой и дробной частей должна использоваться запятая «,»),  $\langle VX \rangle$  - выражение, оформленное согласно синтаксису, Maple и представляющее собой функцию от одной переменной  $x$  (например, “sin(x)”). В  $\langle VX \rangle$  недопустимы пробелы.  $\langle A \rangle$  и  $\langle B \rangle$  - действительные числа, определяющие точки на действительной прямой, соответствующие исходной и конечной вершине ребра соответственно (причём задаваемая функция должна быть определена на отрезке, заключённом между этими двумя точками).

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

### Приложение 3. Описание и функциональное назначение классов

Таблица 3.1

#### Описание и функциональное назначение классов

Класс	Назначение
Graph	Описывает структуру метрического графа.
Edge	Описывает ребро графа.
Vertex	Описывает вершину графа.
MultiEdge	Описывает структуру кратных рёбер, соединяющих заданную пару различных вершин.
MultiLoop	Описывает структуру кратных петель.
VertexPair	Описывает структуру – пару вершин.
MapleHelper	Позволяет выполнять запросы к системе компьютерной алгебры Maple.
MapleException	Описывает исключения, появляющиеся при ошибках обращения к Maple.
Constants	Описывает строковые и численные константы, необходимые для работы программы.
MainWindow	Описывает главное окно программы и основную логику её работы.
AddEdgeDialog	Описывает диалог добавления ребра на граф
RemoveEdgeDialog	Описывает диалог удаления ребра с графа
SettingsDialog	Описывает диалог настроек программы.
VertexRemoveDialog	Описывает диалог удаления вершины с графа.

### Приложение 4. Описание и функциональное назначение полей, методов и свойств

Таблица 4.1

#### Описание полей, методов и свойств класса AddEdgeDialog

Поля				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_р	private readonly	MainWindow	Ссылка на главное окно программы	
Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения	

AddEdgeDialog	public	Конструктор	MainWindow р	Конструктор класса
AddEdge_KeyDown	Private	void	object sender, KeyEventArgs е	Обработывает нажатия клавиш в окне добавления ребра
SubmitEdge			Нет	Вызывается при подтверждении добавления ребра

Таблица 4.2

Описание полей, методов и свойств класса Edge

Поля				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_length	Private	Double	Длина ребра	
_vx		String	Функция на ребре	
Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
IsLoop	Public	Bool	Нет	Определяет, является ли ребро петлѐй
Edge		Конструктор	Vertex fromVertex, Vertex toVertex, double len, string function, double xmin, double xmax	Конструктор класса, создаѐт объект, представляющий ребро графа
Свойства				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Доступ	Назначение
From	Public	Vertex	Get; set	Исходная вершина графа
To				Конечная вершина графа
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения	

Func		String		Выражение для функции на ребре
Length		Double		Длина ребра
Xmin				Значение аргумента функции, соответствующее исходной вершине
Xmax				Значение аргумента функции, соответствующее конечной вершине

Таблица 4.3

Описание полей, методов и свойств класса MapleException

Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
MapleException	public	Конструктор	нет	Конструктор без сообщения
			String t	Конструктор исключения с сообщением

Таблица 4.4

Описание полей, методов и свойств класса Graph

Поля				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_usedDfs	Private	List<Vertex>	Вершины, обработанные алгоритмом поиска компонент связности графа	
Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
AddVertex	Public	Void	int x, int y	Добавляет новую

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

				вершину на граф
AddEdge			Vertex fr, Vertex t, double len, string function, double xMin, double xMax	Добавляет новое ребро на граф
DrawVertex			Vertex v, Graphics gr	Отрисовывает вершину на рабочей области
Graph		Конструктор	Нет	Конструктор класса
EdgeMultiplicity		Int	Edge edge	Возвращает кратность ребра
Draw		Void	Graphics gr	Отрисовывает граф на рабочей области
IsEmpty		Bool	Нет	Определяет, является ли граф пустым
RemoveEdge		Void	Edge x	Удаляет ребро с графа
			Int i	Удаляет ребро (по его индексу) с графа
RemoveVertex			Vertex x	Удаляет вершину с графа
			Int i	Удаляет вершину (по её индексу) с графа
Export		String	Picturebox pb	Возвращает строковое отображение графа в формате .gr
VertexDegree		Int	Vertex v	Определяет
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения	

				степень вершины
IncidentEdges		List<Edge>		Находит инцидентные вершине рёбра
NeighbourVertices		List<Vertex>		Находит все вершины, соседние данной
VertexValue		Double	Vertex v, MapleHelper mh	Вычисляет значение функции на графе в вершине
IsContinuous		Bool	MapleHelper mh	Определяет, является ли функция на графе непрерывной
IsWeakCohesive			Нет	Определяет, является ли граф слабо- связным
Dfs		Void	Vertex v, ref List<List<Vertex >> components	Процедура обхода в глубину для вершины
WeakComponents	Public	List<List<Vertex >>	нет	Находит компоненты связности для графа
ComponentRule		String[]	List<Vertex> vertices, double lambda, MapleHelper mh	Строит правило квантования для компоненты связности
Rules			double lambda, MapleHelper mh	Строит правила квантования для

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



				изменённого в ходе работы алгоритма графа
Phi		String	Edge e	Возвращает символьное выражение для параметра φ для ребра
ComputePhi			Edge e, MapleHelper mh, double lambda = double.NaN	Находит приближённо е значение параметра φ для ребра
GetQuantizationRules		String[]	MapleHelper mh, double lambda	Применяет алгоритм построения правил квантования для графа
Parse	Public static	Graph	List<string> lines	Возвращает объект графа, представляем ый заданными строками в файле типа .gr
Свойства				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Доступ	Назначение
Edges	Public	List<Edge>	Get; set;	Список рёбер графа
Vertices		List<Vertex>		Список вершин графа

Таблица 4.5

### Описание полей, методов и свойств класса Vertex

Поля			
Имя	Модификатор	Тип	Назначение
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения

	доступа			
_rnd	Private readonly	static	Random	Генерирует случайные числа
Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
Vertex	Static	Конструктор	Нет	Статический конструктор класса
	Public		int x, int y, bool rotator = false	Конструктор класса
Свойства				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Доступ	Назначение
X	Public	Int	Get; set;	X-координата вершины
Y				Y-координата вершины

Таблица 4.6

### Описание полей, методов и свойств класса MapleHelper

Поля				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_cache	Private readonly	List<KeyValuePair<string, string>>	Кеш запросов к Maple	
_logWriter		StreamWriter	Служит для логгирования запросов к Maple	
_mapleProcess	Private	Process	Служит для коммуникации с процессом интерпретатора Maple	
_result		List<string>	Хранит результаты запросов, получаемые от Maple	
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения			Дата внесения изменения

Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
StartProcess	Public	Void	String path	Запускает процесс интерпретатора Maple
MapleHelper		Конструктор	string path, double epsilon, bool retryStart = true	Конструктор класса. Запускает процесс Maple, открывает файл для записи лога
Cache	Private	Void	string query, string response	Кеширует ответ Maple на запрос
MapleResult	Public	String	string query, int timeout = Constants.TimeoutMapleDefault, bool retry = true	Возвращает ответ Maple на запрос
Query		Void	string query, int timeout = Constants.TimeoutMapleDefault	Выполняет запрос к Maple, не возвращая ответ
Clear			Нет	Перезапускает Maple
Dispose			Нет	Освобождает используемые ресурсы, реализация интерфейса IDisposable
Func		Double	string function, double x	Возвращает значение действительной функции в данной точке
AreEqual		bool	Double a, double b	Проверяет на равенство (с заданной точностью) два действительных числа
Номер изменения		Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения

			String a, string b	Проверяет на равенство (с заданной точностью) два числа, определенных с помощью выражения Maple
InequalitySystem		String[]	List<string> inequalities	Возвращает решение данной системы неравенств
AreEqualValues		bool	string f1, double x1, string f2, double x2	Проверяет на равенство (с заданной точностью) значения двух функций в заданных точках
Log	Private	Void	string s	Записывает заданную строку в лог-файл
LogQuery			String q	Записывает информацию об отправленном Maple запросе в лог-файл
Свойства				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Доступ	Назначение
Epsilon	Public	double	Get; set;	Точность сравнения значений в Maple
MaplePath		string		Путь к исполняемому файлу интерпретатора Maple

Таблица 4.7

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## Описание полей, методов и свойств класса SettingsDialog

Поля					
Имя		Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_p		Private readonly	MainWindow	Ссылка на главное окно программы	
Методы					
Имя		Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
SaveSettings		Private	Void	Нет	Вызывается при сохранении настроек
browseButton_Click				object sender, EventArgs e	Обработчик события клика по кнопке выбора пути к интерпретатору Maple
SettingsDialog		Public	Конструктор	MainWindow p	Конструктор класса, представляющего форму окна настроек программы

Таблица 4.8

## Описание полей, методов и свойств класса VertexPair

Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
VertexPair	public	Конструктор	Vertex fromVertex, Vertex toVertex	Конструктор класса
Equals		bool	VertexPair vp	Реализация интерфейса IEquatable<VertexPair>, проверка объектов на совпадение

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

Свойства				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Доступ	Назначение
FromVertex	Public	Vertex	Get; set	Исходная вершина
ToVertex				Конечная вершина

Таблица 4.9

Описание полей, методов и свойств класса MultiEdge

Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
MultiEdge	Public	Конструктор	VertexPair pair	Конструктор класса
Свойства				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Доступ	Назначение
Edges	Public	List<Edge>	Get; set	Ребра, соединяющие две вершины
Vertices		VertexPair		Пара вершин

Таблица 4.10

Описание полей, методов и свойств класса MultiLoop

Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
MultiLoop	Public	Конструктор	Vertex v	Конструктор класса
Свойства				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Доступ	Назначение
V	Public	Vertex	Get; set;	Рассматриваемая вершина
Edges				Ребра-петли

Таблица 4.10

Описание полей, методов и свойств класса Methods

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
FormatLength	Public static	String	Double x	Форматирует строковое представление числа для отображения в рабочей области
MapleFormatDouble				Возвращает корректное с точки зрения Maple представление действительного числа x
InputValueFormat			String str	Обрабатывает введённые в поля ввода для пределов аргумента функции на ребре значения
MapleFormatString			String s	Удаляет переносы строки и кавычки на концах строки
Evaluate		Double	String expression	Вычисляет действительное значение заданного строкового арифметического выражения

Таблица 4.11

Описание полей, методов и свойств класса VertexRemoveDialog

Поля				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_p	Private readonly	MainWindow	Ссылка на главное окно программы	
Методы				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
VertexRemoveDialog	Public	Конструктор	MainWindow p	Конструктор класса
VertexRemoveDialog_KeyD	Private	Void	object	Обработка
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения	

own			sender, KeyEventAr gs e	ет нажатия клавиш в пределах окна настроек программы
RemoveVertex			нет	Вызывается при удалении вершины с графа

Таблица 4.12

Описание полей, методов и свойств класса RemoveEdgeDialog

Поля				
Имя	Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_p	Private readonly	MainWindow	Ссылка на главное окно программы	
Методы				
Имя	Модифика тор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
RemoveEdgeDialog	Public	Конструкт ор	MainWindow p	Конструктор класса
EdgeRemoveDialog_KeyDown	Private	Void	object sender, KeyEventArgs e	Обрабатыва ет нажатия клавиш в пределах окна удаления ребра
RemoveEdge			Нет	Вызывается при удалении ребра

Таблица 4.13

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



## Описание полей, методов и свойств класса MainWindow

Поля					
Имя		Модификатор доступа	Тип	Назначение	
_btmBack		Private	Bitmap	Для отрисовки графа на рабочей области	
_epsilon			Double	Значение точности для сравнения значений	
_lambdaMax				Максимальное значение параметра	
_lambdaMin				Минимальное значение параметра	
_mapleExePath			String	Путь к интерпретатору Maple	
_openedFileName				Путь к открытому файлу	
_savedStatus			Bool	Статус сохранения текущего открытого файла	
Методы					
Имя		Модификатор доступа	Тип	Аргументы	Назначение
MainWindow		Public	конструктор	нет	Конструктор класса, представляющего форму главного окна программы
exportButton_Click		Private	void	object sender, EventArgs e	Вызывается по нажатию кнопки экспорта графа в формат PNG
GraphPictureBoxMouseClick					Вызывается по клику по рабочей области, позволяет добавлять вершины на граф
LambdaLimitsLabelUpdate					Нет
Номер изменения		Подпись ответственного за внесение изменения			Дата внесения изменения

te				при изменении пределов на параметр
lambdaTrackBar_ValueChanged			object sender, EventArgs e	Вызывается при изменении значения параметра передвижением ползунка
LoadFile			String file	Загружает файл по заданному пути
MainWindow_FormClosing			object sender, FormClosingEventArgs e	Вызывается при попытке закрыть форму, позволяет корректно завершить работу с приложением
MainWindow_KeyDown			object sender, KeyEventArgs e	Обработывает нажатия клавиш в пределах главного окна программы, позволяет использовать горячие клавиши
MainWindow_Load			object sender, EventArgs e	Вызывается при загрузке главного окна программы
MainWindow_Paint			object sender, PaintEventArgs e	Вызывается при перерисовке главного окна

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

				программы
MainWindow_Resize			object sender, EventArgs e	Вызывается при изменении размера главного окна программы
MainWindow_Shown				Вызывается, когда главное окно приложения в первый раз отображается
MapleHelperUpdate			Нет	Заменяет текущий экземпляр класса MapleHelper на новый, использующий обновлённые параметры
NewGraph				Создаёт новый граф
OpenFile				Позволяет открыть новый файл
PickAndSave			String text	Позволяет пользователю выбрать файл и сохраняет в него переданный текст
RaiseAddEdge			Нет	Вызывает диалог добавления ребра на граф
RaiseNewGraphDialog				Если граф не сохранён, предлагает

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

				пользователю сделать это, иначе сразу создаётся новый граф
RaiseOpenFile				Если граф не сохранён, предлагает пользователю сделать это, иначе сразу вызывается диалог открытия файл
RaiseRemoveEdge				Вызывает диалог удаления ребра
RaiseRemoveVertex				Вызывает диалог удаления вершины
RaiseSettingsBox				Вызывает окно настроек приложения
runButton_Click			object sender, EventArgs e	Вызывается при нажатии на кнопку построения правил квантования
saveAsButtion_Click			object sender, EventArgs e	Вызывается при нажатии на кнопку «Save as»
SaveFile			Нет	Логика работы кнопки «Save»
WriteFile			string text, string	Записывает
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения	

			file	переданный текст в файл по переданному пути
Свойства				
Имя	Модифика тор доступа	Тип	Доступ	Назначение
CheckContinuality	Public	bool	Get; set;	Устанавливае т, проверять ли непрерывност ь функции при добавлении ребра
Epsilon		double		Значение точности для сравнения значений
Gr		Graphics	Get; private set;	Позволяет отрисовывать граф на рабочей области
GraphOpened		Graph		Открытый граф
Lambda		Double	Get; set;	Значение параметра (текущее)
LambdaMax				Максимально е значение параметра
LambdaMin				Минимальное значение параметра
MapleExePath		String		Путь к интерпретато ру Maple
Mh		MapleHel per	Get; private set;	Экземпляр класса для
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения	

				взаимодейств ия с Maple
OpenedFileName		String	Get; set;	Путь к открытому файлу
SavedStatus		bool		Статус сохранения открытого в настоящее время файла

Таблица 4.14

Описание полей, методов и свойств класса Constants

Поля			
Имя	Модификатор доступа	Тип	Назначение
ContinuousFuncMsg	Public const	String	Сообщение о том, что заданная на графе функция является непрерывной
NotContinuousFuncMsg			Сообщение о том, что заданная на графе функция не является непрерывной
TimeoutMapleDefault		Int	Максимальное время ожидания (в мс) ответа от Maple по умолчанию
TimeEpsilonMapleDefault			Минимальный промежуток времени, через который нужно проверять наличие ответа от Maple
TimeoutMapleSimpleDefault			Максимальное время ожидания (в мс) ответа от Maple по умолчанию для некоторых (простых) запросов
SafePictureboxDistance			Константа,
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения		Дата внесения изменения

			определяющая, на каком расстоянии от уже добавленных вершин можно добавлять новые с помощью мышки
MaximumMapleQueryLength			Максимальная длина запроса к Maple (применяется при обработке очереди из большого числа коротких запросов)
MapleLogPath		String	Относительный путь к лог-файлу запросов к Maple
LambdaMinDefault		Double	Минимальное значение параметра по-умолчанию
LambdaMaxDefault			Максимальное значение параметра по-умолчанию
EpsilonDefault			Значение точности для сравнения по-умолчанию
SpecifyMaplePathMsg		String	Сообщение о том, что требуется определить путь к интерпретатору Maple
SavingFileTitle			Заголовок сообщений с предложениями сохранить файл
NotSavedToCreateMessage			Сообщение о том, что файл не сохранён (при создании нового файла)
NotSavedToOpenMessage			Сообщение о том, что файл не сохранён (при открытии файла)
NotSavedMessage			Сообщение о том, что файл не сохранен
NotSavedToRunTitle			Заголовок сообщения о том, что файл не
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения	

			сохранен (перед запуском построения правил квантования)
NotSavedToRunMessage			Сообщение о том, что файл не сохранен (перед запуском построения правил квантования)
ParsingErrorMessage			Сообщение о ошибке содержимого открываемого файла
ParsingVerticesErrorMessage			Сообщение о некорректном определении вершин в открываемом файле
ParsingEdgesErrorMessage			Сообщение о некорректном определении рёбер в открываемом файле
ParsingWorkspaceSizeErrorMessage			Сообщение о некорректном определении размера рабочей области в открываемом файле
SavingErrorMessage			Сообщение об ошибке при сохранении файла
NoVerticesMessage			Сообщение о том, что на графе отсутствуют вершины
NoEdgesMessage			Сообщение о том, что на графе отсутствуют рёбра
GeneralErrorMessage			Сообщение об ошибке
FiletypeErrorMessage			Сообщение об ошибке определения типа файла
GrFileMask			Маска формата .gr (для диалога открытия или сохранения файла)
Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения	



WindowTitle			Заголовок главного окна приложения
SystemRegexp			Первый вариант регулярного выражения для интервала решений системы неравенств в ответе Maple
SystemRegexp2			Второй вариант регулярного выражения для интервала решений системы неравенств в ответе Maple

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

[illegible]

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения