

**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**

**Программа и методика испытаний**

**ЛИСТ УТВЕРЖДЕНИЯ  
RU.17701729.503390-01 51 01-1-ЛУ**

Инв. № подл.	Подп. и дата
RU.17701729.5033 90-01 51 01-1-ЛУ	
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	

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

УТВЕРЖДЕНО

RU.17701729.503390-01 51 01-1-ЛУ

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

Программа и методика испытаний  
RU.17701729.503390-01 51 01-1

**Листов 32**

<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 51 01-1				

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Объект испытания .....	4
1.1. Наименование .....	4
1.2. Область применения .....	4
1.3. Обозначение испытуемой программы .....	4
2. Цель испытаний .....	5
3. Требования к программе.....	6
3.1. Требования к функциональным характеристикам .....	6
3.1.1. Требования к составу выполняемых функций.....	6
3.1.2. Требования к организации входных данных .....	6
3.1.3. Требования к организации выходных данных.....	6
3.2. Требования к интерфейсу.....	6
3.3. Требования к алгоритму и к формату входных и выходных данных.....	8
3.4. Требования к надёжности .....	8
4. Требования к программной документации.....	9
4.1. Состав программной документации.....	9
4.2. Специальные требования к программной документации.....	9
5. Средства и порядок испытаний .....	10
5.1. Технические средства, используемые во время испытаний.....	10
5.2. Программные средства, используемые во время испытаний.....	10
5.3. Порядок проведения испытаний.....	10
5.4. Условия проведения испытаний.....	11
5.4.1. Климатические условия.....	11
5.4.2. Требования к численности и квалификации персонала.....	11
6. Методы испытаний.....	12
6.1. Испытание выполнений требований к программной документации .....	12
6.2. Испытание выполнений требований к интерфейсу.....	12
6.3. Испытание выполнений требований к функциональным характеристикам ....	12
6.3.1. Запуск программы.....	13

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

6.3.2. Редактирование графа .....	13
6.3.3. Работа с файлами, представляющими графы.....	17
6.3.4. Изменение параметров программы.....	19
6.3.5. Дополнительные элементы интерфейса .....	20
6.3.6. Горячие клавиши.....	22
6.3.7. Построение правил квантования .....	22
6.3.8. Выход из программы .....	25
6.4. Испытания выполнений требований к надёжности. ....	25
7. Приложения .....	26
Приложение 1. Используемые понятия и определения .....	26
Приложение 2. Список используемой литературы.....	29
Приложение 3. Описание формата .gr.....	29

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## 1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ

### 1.1. Наименование

Наименование программы – «Программа для построения правил квантования для метрических графов».

### 1.2. Область применения

«Программа для построения правил квантования для метрических графов» - программа, реализующая алгоритм построения правил квантования для метрических графов, описанный в статье В. Л. Чернышева и А. И. Шафаревича «Квазиклассический спектр оператора Шрёдингера на геометрическом графе» [1].

Задача программы заключается в обеспечении возможности построить соответствующие правила для заданного пользователем графа.

Решение данной задачи может использоваться исследователями, работающими в различных областях математической физики при рассмотрении спектральных задач на геометрических графах.

### 1.3. Обозначение испытываемой программы

Краткое обозначение испытываемой программы – Quantum.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## 2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Цель проведения испытаний - проверка соответствия характеристик данного программного продукта функциональным требованиям и требованиям к надёжности, изложенных в документе Техническое задание к программе.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММЕ

#### 3.1. Требования к функциональным характеристикам

##### 3.1.1. Требования к составу выполняемых функций

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.

##### 3.1.2. Требования к организации входных данных

Программа должна предоставлять возможность открытия файла с расширением .gr (формат для представления графа в компьютере), в котором описан граф с не более чем 200 вершинами и/или 250 рёбрами.

##### 3.1.3. Требования к организации выходных данных

Программа должна позволять сохранять правила квантования в текстовый файл формата .txt.

#### 3.2. Требования к интерфейсу

Интерфейс приложения должен представлять собой обычный Windows-интерфейс.

В программе должно быть размещено главное окно, с которого начинается её работа, и которое позволяет задать граф для обработки.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

Его необходимые элементы:

- 1) Кнопка, позволяющая создать новый граф.
- 2) Кнопка, вызывающая окно выбора файла для открытия.
- 3) Кнопка, вызывающая окно выбора файла для сохранения.
- 4) Рабочая область, представляющая собой поле, на котором возможно отмечать новые вершины графа, и отображающая рёбра (и их длины) и вершины текущего графа.
- 5) Кнопки, вызывающие окна для удаления какой-либо вершины и ребра соответственно.
- 6) Кнопка, позволяющая сохранить визуальное представление графа в графический формат PNG.
- 7) Кнопка, позволяющая добавить ребро на граф.
- 8) Кнопка, позволяющая запустить процесс построения правил квантования для описанного графа.
- 9) Кнопки, позволяющие изменить размер рабочей области.
- 10) Ползунок, позволяющий изменить параметр  $\lambda$ .
- 11) Кнопка, вызывающая окно настроек программы.

Окно настроек программы должно позволять:

- 1) Указать минимальное и максимальное значение  $\lambda$ , из которых можно выбирать значение данного параметра в основной программе.
- 2) Указать точность, с которой будут сравниваться вычисляемые в процессе работы программы выражения в Maple.
- 3) Указать путь к исполняемому файлу интерпретатора Maple.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



Программа должна иметь интерфейс на английском языке.

### **3.3. Требования к алгоритму и к формату входных и выходных данных**

В программе используется алгоритм, описанный в статье «Квазиклассический спектр оператора Шрёдингера на геометрическом графе» [1].

Входные файлы должны иметь формат .gr (совместимый с текстовым форматом .txt), который требуется разработать для данной программы. В нём должна быть предусмотрена возможность хранения графа с координатами вершин, длинами рёбер и информацией о функции на графе.

Выходной файл – текстовый файл формата .txt.

### **3.4. Требования к надёжности**

Для корректной работы программы необходима устойчивая работа компьютера, на котором она запущена, а также устойчивая работа его операционной системы и математического пакета Maple версии 18 или 2015.

Программа должна обрабатывать все исключительные ситуации, такие как:

- Ошибка доступа к файлу, задающему граф, или некорректность содержащихся в нём данных.
- Ошибка записи результата работы в выходной текстовый файл.
- Другие ошибки, обусловленные некорректностью задаваемого графа (например, заданная на нём функция не является непрерывной) или ошибками, обусловленными внутренними ошибками математического пакета Maple.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## **4. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

### **4.1. Состав программной документации**

Программа должна быть представлена к испытаниям с документацией в следующем составе:

- 1) «Программная реализация алгоритма построения правил квантования для метрических графов». Техническое задание (ГОСТ 19.201-78);
- 2) «Программная реализация алгоритма построения правил квантования для метрических графов». Текст программы (ГОСТ 19.401-78);
- 3) «Программная реализация алгоритма построения правил квантования для метрических графов». Пояснительная записка (ГОСТ 19.404-79);
- 4) «Программная реализация алгоритма построения правил квантования для метрических графов». Программа и методика испытаний (ГОСТ 19.301-78);
- 5) «Программная реализация алгоритма построения правил квантования для метрических графов». Руководство оператора (ГОСТ 19.505-79).

### **4.2. Специальные требования к программной документации**

- 1) Вся документация должна быть составлена согласно ЕСПД (ГОСТ 19.101-77, 19.104-78, 19.105-78, 19.106-78 и ГОСТ к соответствующим документам (см. выше)) [4].
- 2) Вся документация сдаётся в печатном виде с подписанными листами утверждения.
- 3) Вся документация сдаётся в электронном виде (в формате .pdf или .docx) в составе курсовой работы в заархивированном виде в систему LMS НИУ ВШЭ.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## **5. СРЕДСТВА И ПОРЯДОК ИСПЫТАНИЙ**

### **5.1. Технические средства, используемые во время испытаний**

Для бесперебойной стабильной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками:

- 1) Процессор Pentium 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 жестком диске;
- 4) Дисковод для компакт- или DVD-дисков;
- 5) Клавиатура, мышь или совместимое указывающее устройство;
- 6) Видеокарта и монитор, поддерживающие режим Super VGA с разрешением не менее чем 800х600 точек.

### **5.2. Программные средства, используемые во время испытаний**

Для бесперебойной стабильной работы программы необходим следующий минимальный набор программных средств:

- 1) операционная система Microsoft Windows 7 и новее;
- 2) установленный Microsoft .NET Framework 4.5.2 и новее;
- 3) установленный математический пакет Maple версии 18 или 2015;
- 4) диск, в составе которого должны присутствовать программная документация, исполняемые файлы программы и презентация программного продукта.

### **5.3. Порядок проведения испытаний**

Испытания должны проводиться в следующем порядке:

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

- 1) проверка требований к программной документации;
- 2) проверка требований к интерфейсу программы;
- 3) проверка требований к функциональным характеристикам программного продукта;
- 4) проверка требований к надёжности программы.

#### **5.4. Условия проведения испытаний**

##### **5.4.1. Климатические условия**

Климатические условия эксплуатации, при которых должны обеспечиваться заданные характеристики, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к персональным компьютерам и компакт-дискам (CD) в части условий их эксплуатации.

Персональный компьютер предназначен для работы в закрытом отапливаемом помещении со стабильными климатическими условиями категории 4.1 согласно ГОСТ 15150-69 [5].

Для предотвращения повреждений компакт-диска (CD) и сохранения на нем записанной информации необходимо поддерживать следующие климатические условия [6]:

- 1) влажность от 20 до 70 процентов;
- 2) температура от 5 до 30 градусов Цельсия;
- 3) атмосферное давление — от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.).

##### **5.4.2. Требования к численности и квалификации персонала**

Для работы программы требуется один оператор ЭВМ (пользователь программы).

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## **6. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ**

### **6.1. Испытание выполнений требований к программной документации**

Состав программной документации проверяется визуально, проверяется наличие всех подписей и наличие программной документации в составе загруженного архива с курсовой работой в системе LMS НИУ ВШЭ. Также визуально проверяется соответствие документации требованиям соответствующих ГОСТ. Все документы удовлетворяют представленным требованиям.

### **6.2. Испытание выполнений требований к интерфейсу**

Интерфейс программы представляет собой Windows-приложение. Наличие реализации всех описанных в требованиях к интерфейсу требований проверяется визуально. В программе размещено главное окно, с которого начинается её работа, и которое позволяет задать граф для обработки. Все необходимые его элементы (кнопки, рабочая область, ползунок для изменения параметра) присутствуют. Предусмотрены диалог настроек, диалог добавления ребра на граф, диалог удаления ребра с графа и диалог удаления вершины с графа. Программа имеет интерфейс на английском языке.

Разработанная программа удовлетворяет представленным требованиям к интерфейсу.

### **6.3. Испытание выполнений требований к функциональным характеристикам**

В этом разделе описана реализация примера 2 («Дерево с двумя лямбда-вершинами») из статьи [1] с помощью данного программного продукта и построение по нему правил квантования (а также попутная проверка остальных функций программы)

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

### 6.3.1. Запуск программы

Перед запуском исполняемый .exe-файл с программой необходимо переместить в отдельную папку. Запуск программы производится с помощью двойного клика по исполняемому .exe-файлу. После запуска программы отображается главное окно:

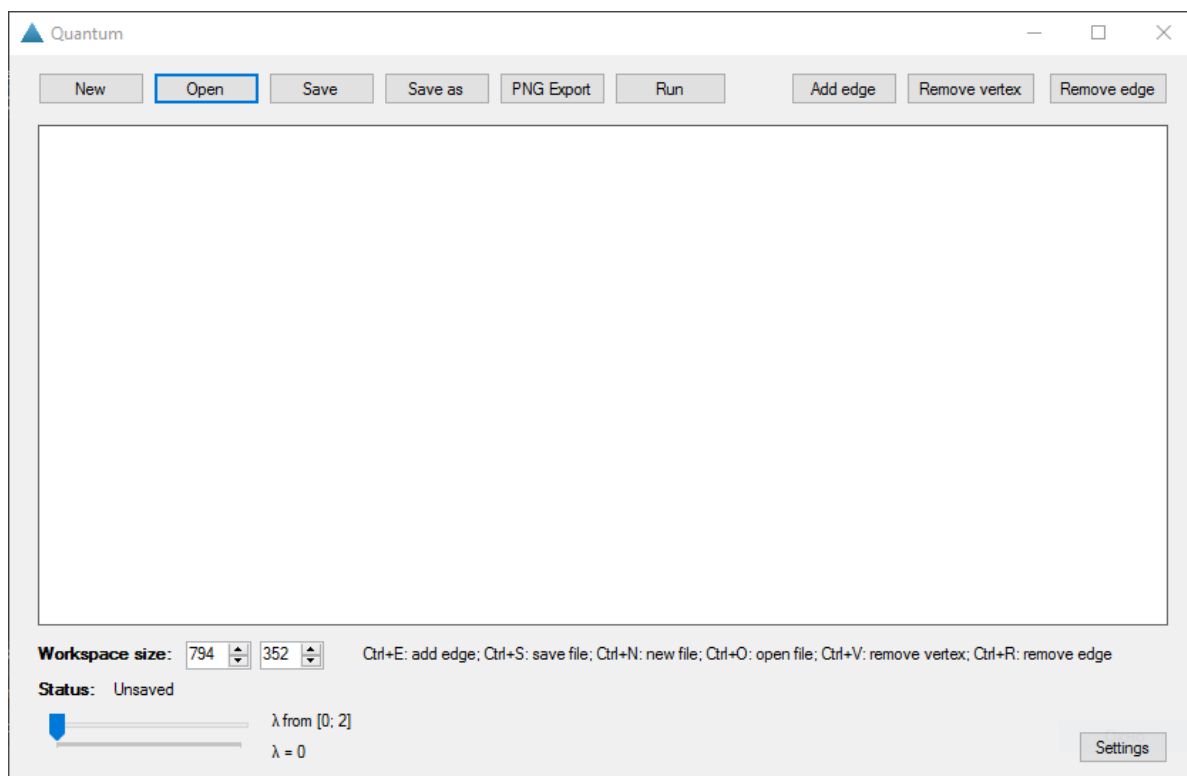


Рисунок 1.

### 6.3.2. Редактирование графа

Добавляем на граф четыре вершины (три необходимы для примера, одна лишняя) с помощью клика левой кнопкой мыши.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



Рисунок 2.

Удаляем вершину 4 с помощью диалога, вызываемого кнопкой “Remove vertex”:

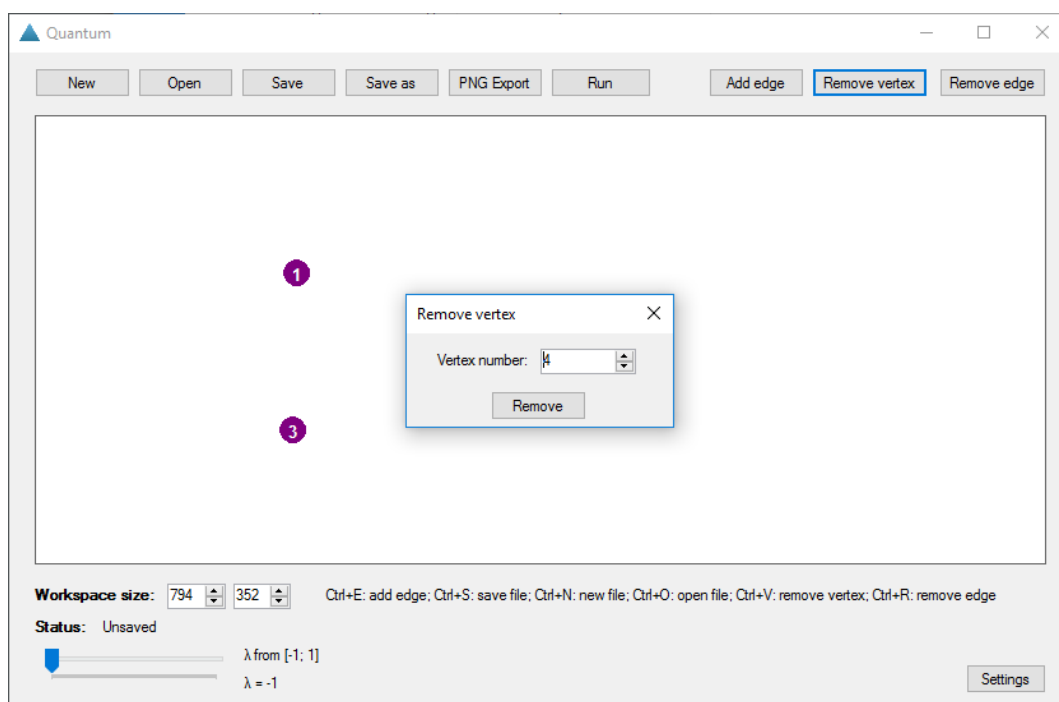


Рисунок 3.

Как можно видеть, вершина была удалена с графа.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

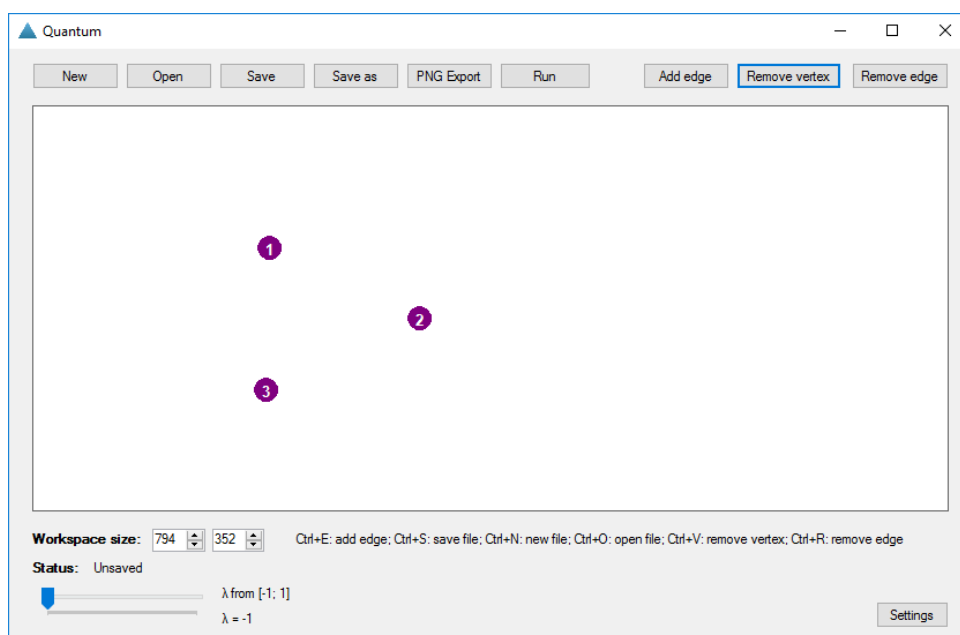


Рисунок 4.

Добавим рёбра на граф. Пусть для ребра, соединяющего вершины 1 и 2, функция  $V(x)=x$  для  $x$  от 2 до 0, для ребра, соединяющего вершины 3 и 2, функция  $V(x)=x$  от 1.5 до 0, длины обоих рёбер 1. Также добавим лишнее ребро-петлю для вершины 2 с нулевой функцией на отрезке  $[0;1]$  Ниже приведён пример заполнения формы в диалоге добавления ребра для второго ребра.

Add edge

Initial vertex

3

Final vertex

2

Length

1

$V(x)$  (Maple)

$x$

$x_{\min}$

1.5

$x_{\max}$

0

Add edge

Cancel

Рисунок 5.

Рёбра были успешно добавлены на граф.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



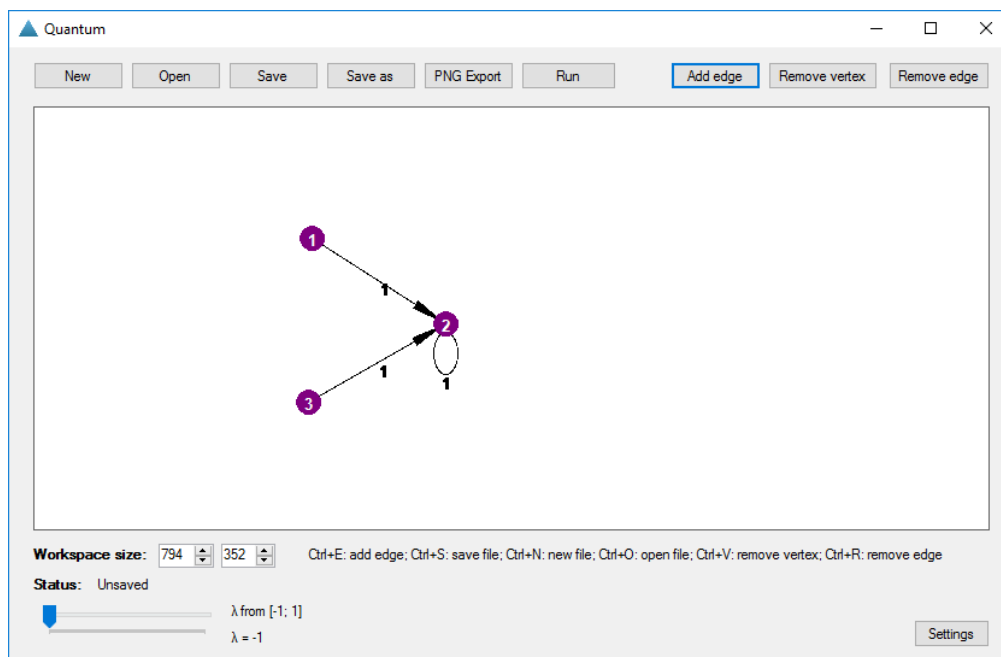


Рисунок 6.

Удалим лишнее ребро-петлю с помощью диалога «Remove edge». Выбираем там нужное ребро и нажимаем кнопку Remove.

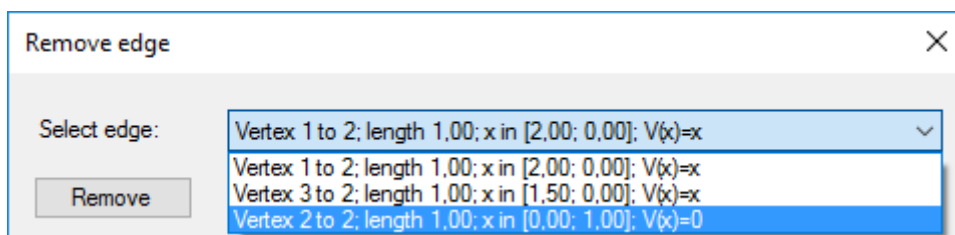


Рисунок 7.

Ребро было успешно удалено с графа.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

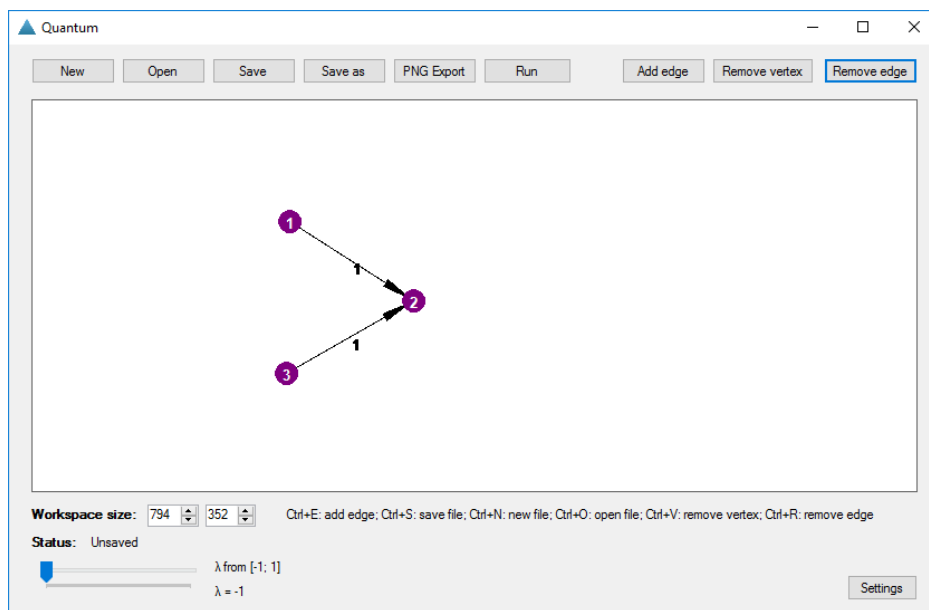


Рисунок 8.

### 6.3.3. Работа с файлами, представляющими графы

Сохраним созданный граф в файл. По нажатию кнопки Save появляется диалог выбора пути сохранения файла.

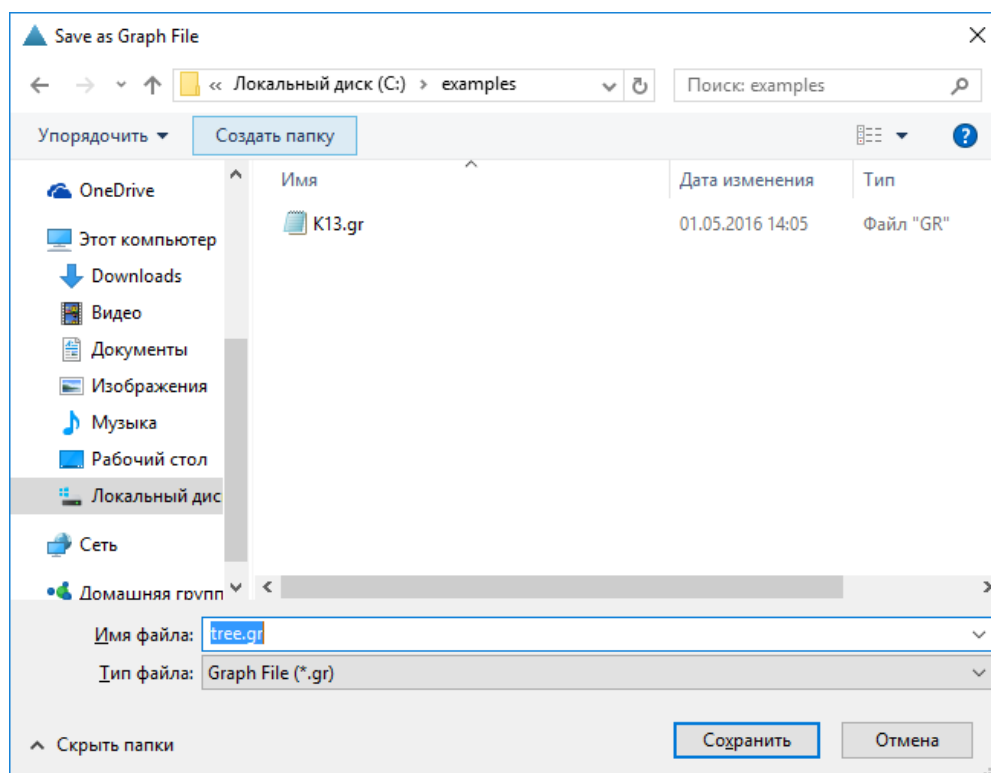


Рисунок 9.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

Сохранение прошло успешно. Нажмём кнопку New, чтобы создать новый граф. Как можно видеть, был создан новый пустой граф, а окно программы выглядит так же, как на рисунке 1. Откроем сохранённый файл, нажав кнопку Open и выбрав сохранённый файл с помощью диалога открытия файла.

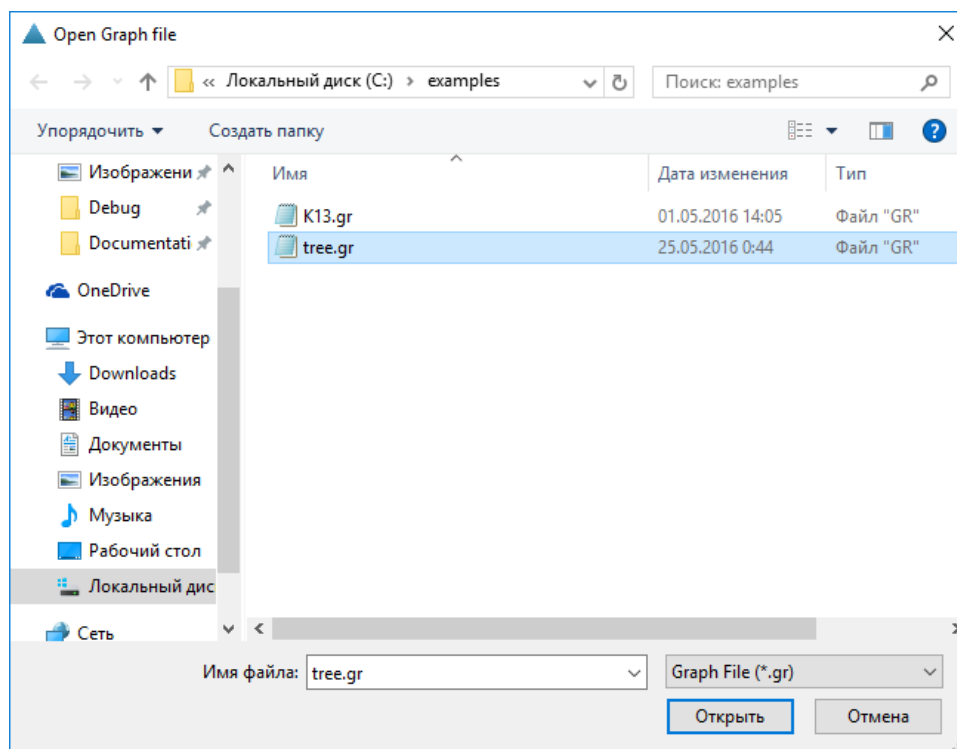


Рисунок 10.

Как можно видеть, граф был успешно импортирован и отображён. После загрузки файла получили оповещение о том, что функция на графе является непрерывной, а верхней части программы теперь отображается путь к открытому файлу.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

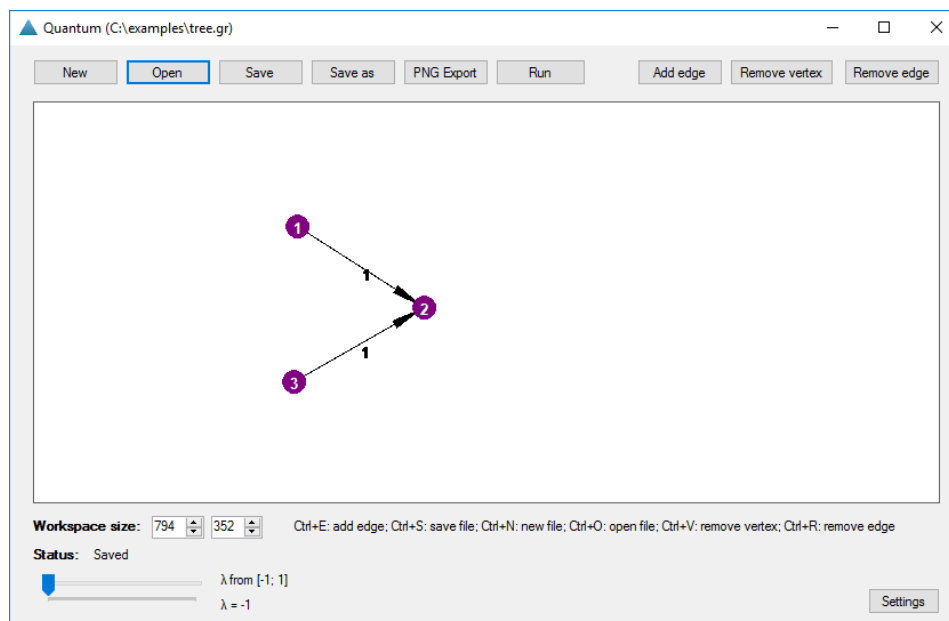


Рисунок 11.

### 6.3.4. Изменение параметров программы

Нажав кнопку Settings, перейдём в окно настроек программы.

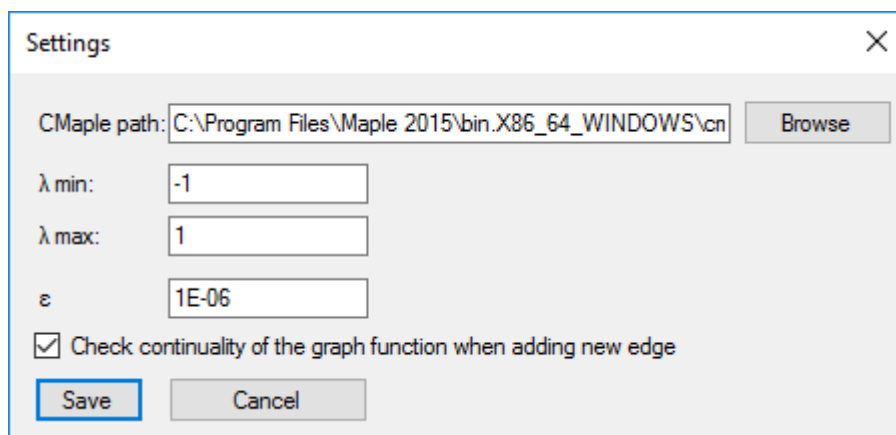


Рисунок 12.

Изменим максимальное и минимальное значение параметра  $\lambda$ .

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

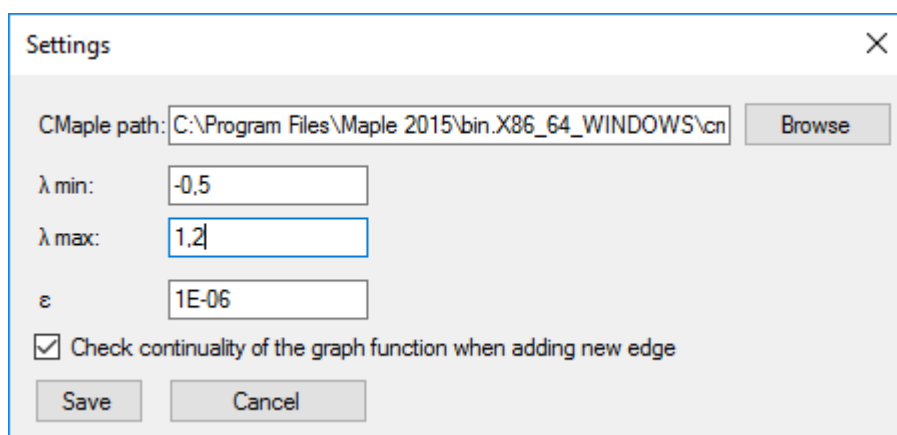


Рисунок 13.

Применим изменения, нажав кнопку Save. Как можно видеть, теперь параметр меняется в пределах отрезка  $[-0,5; 1,2]$ .

### 6.3.5. Дополнительные элементы интерфейса

Ползунок для изменения параметра  $\lambda$ , расположенный в нижней части окна приложения, работает корректно. В частности, после изменения пределов на параметр в предыдущем пункте они корректно изменились и для ползунка.



Рисунок 14.

В нижней части окна приложения также размещены поля для задания размеров рабочей области. Изменим этот размер, введя необходимые размеры в поля и нажав клавишу Enter для каждого поля (это также можно сделать с помощью соответствующих кнопок-стрелочек).

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

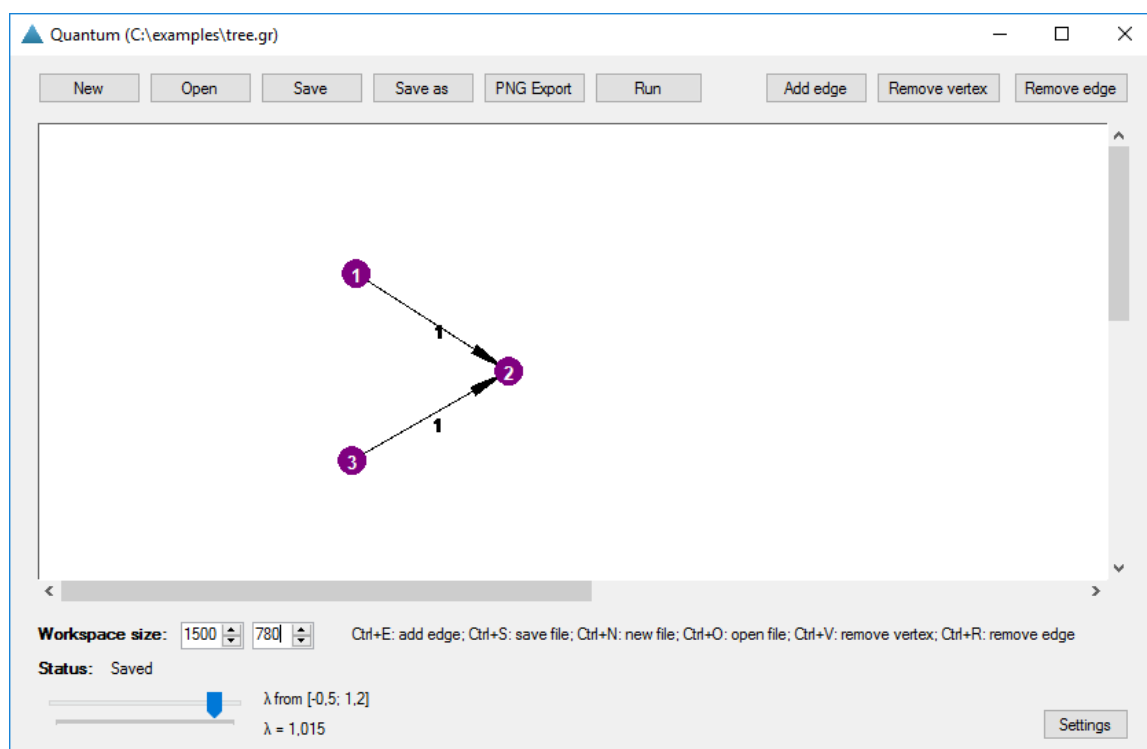


Рисунок 15.

Как можно видеть, на границах рабочей области появились скролл-бары для получения доступа к более удалённым районам рабочей области. Также можно изменять размер окна приложения, в том числе развернуть его на полный экран.

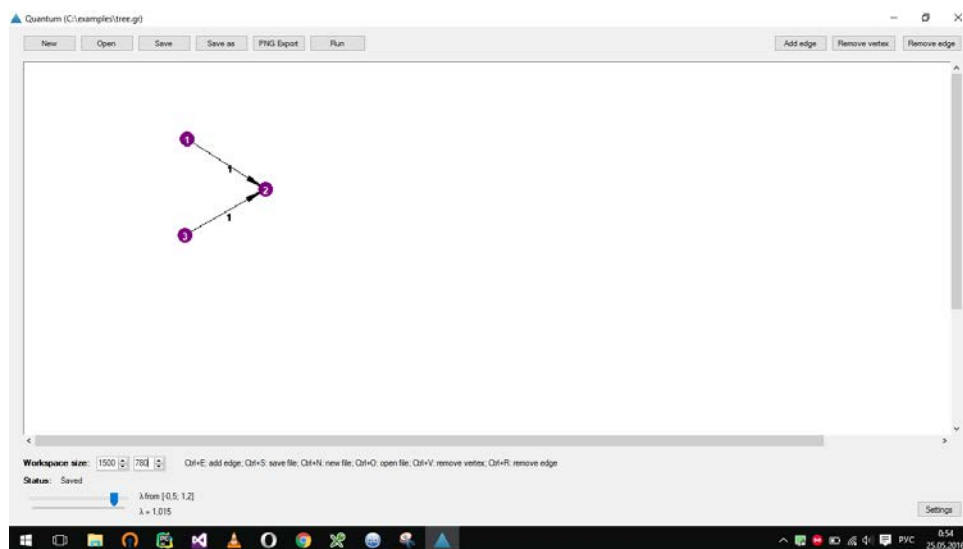


Рисунок 16.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

В нижней части окна также размещено информационное сообщение о том, сохранён ли открытый в настоящее время файл. Оно корректно меняется, когда в файл вносятся изменения или создаётся новый файл.

### 6.3.6. Горячие клавиши

Для удобства работы с приложением предусмотрена поддержка следующих комбинаций клавиш:

1. Ctrl+E: вызов диалога добавления ребра на граф
2. Ctrl+S: сохранить файл
3. Ctrl+O: открыть файл
4. Ctrl+V: открыть диалог удаления вершины
5. Ctrl+R: открыть диалог удаления ребра.

Данные комбинации клавиш также указаны в нижней части главного окна программы. Проверка показывает, что все эти комбинации горячих клавиш работают корректно.

### 6.3.7. Построение правил квантования

Выберем параметр  $\lambda=1,015$ . Для этого в настройках изменим пределы для выбора этого параметра. Необходимо потянуть ползунок левой кнопкой мыши в нужную сторону (вправо – больше, влево – меньше).



Рисунок 17.

Запустим процесс построения правил квантования, нажав кнопку Run. В заголовке окна программы появится надпись “(Working)”, означающая, что процесс начался.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

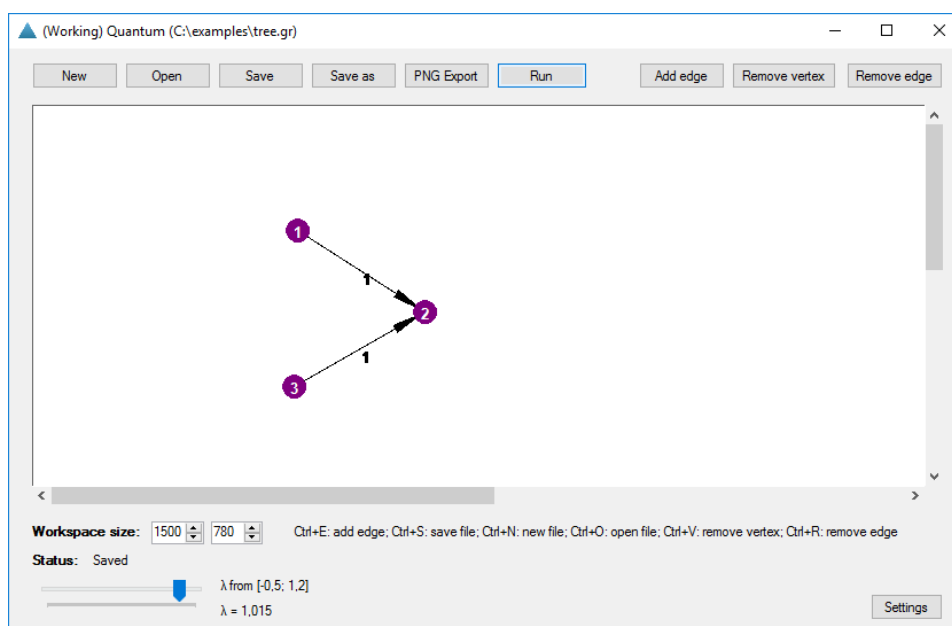


Рисунок 18.

Через несколько секунд процесс завершился, и появилось окно с предложением выбрать .txt-файл, в который будут сохранены построенные правила.

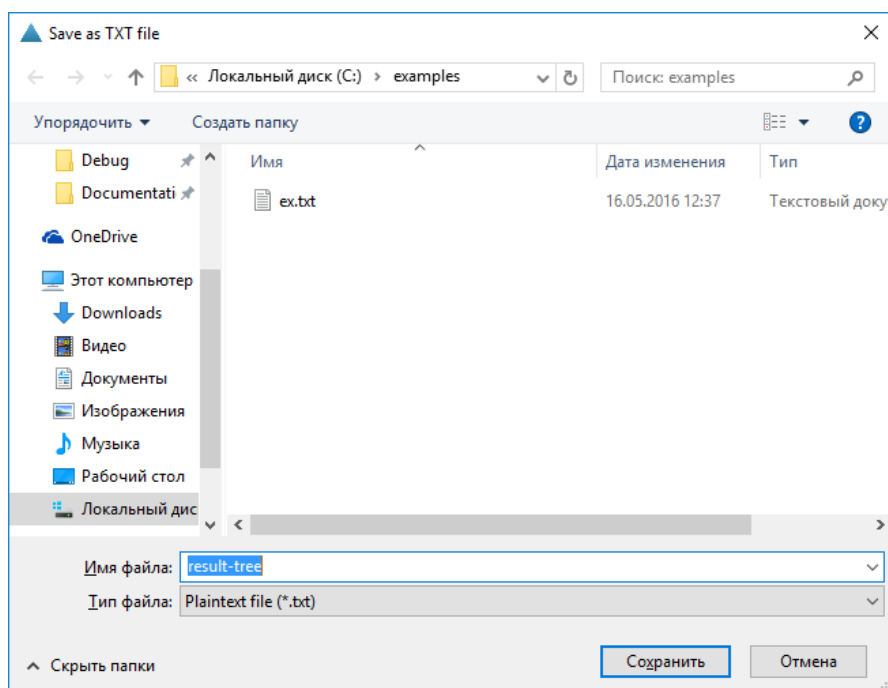


Рисунок 19.

Файл был успешно сохранён в выбранную директорию. Рассмотрим содержимое файла.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения



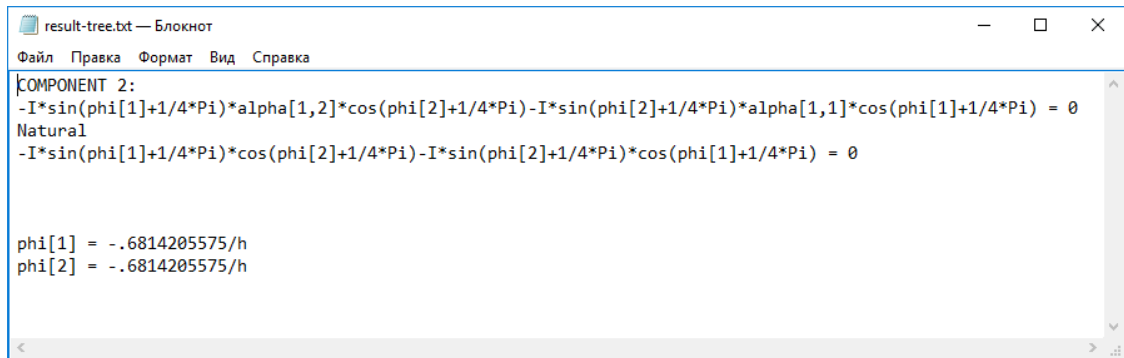


Рисунок 20.

Для единственной компоненты связности изменённого в ходе построения правил квантования (согласно алгоритму) графа были построены правила квантования согласно алгоритму, описанному в статье [1] – приведено правило квантования для общего случая, а также натуральный вид правил квантования. Эти правила (уравнения) совпадают с выписанными уравнениями для данного примера в статье [1] с точностью до перестановки индексов у переменных и постоянных множителей у уравнений (поскольку уравнения можно умножать на ненулевые константы, уравнения-результат работы программы и описанные в статье уравнения будут равносильны). Также для заданной на графе функции были приближённо вычислены параметры  $\phi$  для обоих рёбер.

Стоит отметить, что в процессе работы алгоритма из графа были исключены участки, где значение функции меньше заданного параметра  $\lambda$ , поэтому изменённый граф действительно имеет вид дерева с двумя лямбда-вершинами (они отображаются зелёным цветом), как это и описано в упомянутом примере в статье [1]:

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

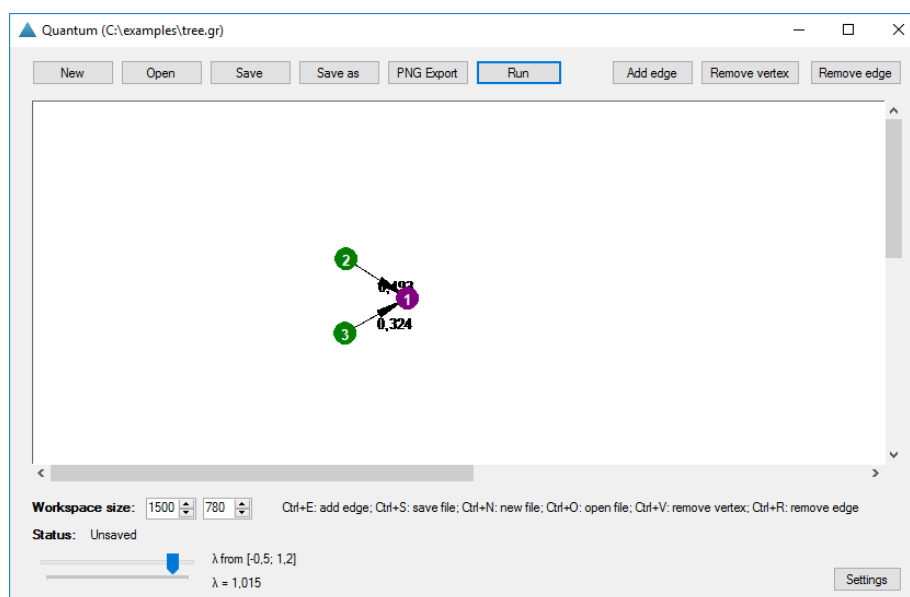


Рисунок 21.

### 6.3.8. Выход из программы

Выйдем из программы, нажав на крестик в правом верхнем углу главного окна программы. Программа успешно завершила свою работу, предложив перед сохранением сохранить изменённый граф.

## 6.4. Испытания выполнений требований к надёжности.

Во время испытания выполнений требований к надёжности производились следующие действия:

1. программе на вход подавались файлы, не являющиеся файлами, размеченными согласно формату .gr (например, файлы формата .docx и .pdf);
2. программе на вход подавались файлы .gr, изменённые с помощью текстового редактора так, что они больше не являлись корректным описанием графа (например, добавлялись некорректные строки или длина ребра изменялась на некоторое неположительное число);
3. при добавлении ребра добавлялись равные друг другу пределы функции; задавалась отрицательная длина, некорректное Maple-выражение для функции

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

4. при сохранении файла (или экспортировании в PNG) указывался файл, открытый в другой программе (т.е. запись в него невозможна);
5. в диалоге настроек программы прописывался путь к отсутствующему файлу или файлу, не являющимся исполняемым файлом интерпретатора Maple, устанавливалось отрицательное значение точности сравнения выражений;
6. создавалась ситуация, когда перед запуском процесса построения правил квантования граф являлся несвязным, или функция на нём не являлась непрерывной;
7. приложение помещалось в директорию, недоступную для записи (т.е. запись в файл настроек, хранящийся в этой же директории, недоступна).

Программа успешно перенесла испытания и в каждом случае выдавала информационное сообщение или сообщение об ошибке, соответствующее данному случаю, и продолжало работу (например, когда файл настроек недоступен для записи, изменённые настройки запоминались до момента закрытия программы).

## 7. 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  $v$ .

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

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).

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 действительнзначная 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.

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

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 собственным 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.

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.

Лямбда-вершины (точки поворота, вершины поворота) – точки, где значение функции на графе совпадает с заданным параметром  $\lambda$ .

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

## Приложение 2. Список используемой литературы

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. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Изд-во стандартов, 1997.
6. Устинов В. Надежность оптических дисков: как их правильно хранить и использовать. //Журнал «625» №7. М.: Издательство «625», 2005

## Приложение 3. 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

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

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 <X> - длина (в пикселях) рабочей области, <Y> - её высота. <X> и <Y> - 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 «<X> <Y>», где <X> - X-координата центра вершины, <Y> - 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 «<V1> <V2> <L> <VX> <A> <B>». Здесь <V1> и <V2> – номера исходной и конечной вершин ребра соответственно: это целые числа, лежащие в диапазоне от 1 до количества вершин, определённых в предыдущем блоке, <L> - длина ребра, представленная положительным действительным числом (для разделения целой и дробной частей должна использоваться запятая «,»), <VX> - выражение, оформленное согласно синтаксису, Maple и представляющее собой функцию от одной переменной x (например,

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения

“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



[illegible]

Номер изменения	Подпись ответственного за внесение изменения	Дата внесения изменения