Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский университет ИТМО»

Факультет Программной инженерии и компьютерной техники

Отчёт к практическому заданию №1

по «Низкоуровнему программированию»

<u>Выполнил</u>: Группа P33312 Хайкин О.И.

<u>Преподаватель</u>:

Кореньков Ю.Д.

Санкт-Петербург, 2023

Цели

Целью данного задания является создание программного модуля, реализующего хранение в файле данных информации, поддерживающим операции выборки, вставки, обновления и удаления. Файл данных может достигать размером 10 гигабайт.

Вариант:

Реляционные таблицы - чтение/запись

Задачи

Настройка репозитория

Первым делом был создан локальный git-репозиторй и 2 remote-репозитория - на Github’е и на Gitlab’е. Затем была произведена настрока репозитория - создание структуры директорий проекта, настрока системы сборки (в случае данного проекта - CMake), настрока файлов .clang-format и .clang-tidy и т.д.

Этот пункт можно считать подготовительным

Проектирование и реализация модулей “снизу-вверх”

После настройки репозитория начались проектирование и реализация модулей. В данном проекте я реализовывал их снизу-вверх, начиная от самых “низкоуровневых” функций - работа непосредственно с файлом, работа со страницами и т.д., и поднимался до “высокоуровневых” функций - API модуля со структурами запросов, мэнэджер запросов и т.д.

Тестирование

После реализации необходимого функционала я перешёл к созданию тестов для программы. Тесты включают в себя простые тесты, которые подключены к GIthub Actions, и стресс-тесты, необходимые для отчёта

Подготовка отчёта

С информацией, полученной от стресс-тестов, можно было приступать к подготовке этого отчёта

Описание работы

Структура программы

Созданную программу можно разделить на 2 части: библиотека и тесты. Библиотека реализует весь функционал и собирается как отдельный модуль. Тесты же используют API предоставленный библиотекой и выполняют различные операции с хранилищем данных.

Для использования программы пользователем ему нужно самому написать свою программу, которая будет вызывать предоставленные функции.

Структура библиотеки

Библиотека состоит из исходных файлов и набора заголовочных файлов. Заголовочные файлы разделены на 2 директории: public и private. Заголовки, находящиеся в public директории, предоставляют публичный интерфейс соответствующего исходника. Заголовки из private описывают защищённый интерфейс соответсвующего исходника. Private-заголовки могут использоваться в других исходниках и обычно содержат информацию о полях структур.

Библиотека построена на объектной парадигме. Непрозрачные структуры данных, для которых заданы “методы” (функции, принимающие первым аргументом такие структуры в качестве “объекта”), будем называть далее классами.

Примечание: в данной программе в ряде случаев используются принципы наследования и полиморфизма. В то же время, этот функционал не поддерживается для всех “классов”, а только для тех, для которых это было необходимо в контексте реализованной программы.

Модули библиотеки

util

Тут всё просто - это утилитный модуль, содержащий функционал, не относящийся к реализации хранилища данных

error

Это модуль, содержащий функционал, относящийся к системе ошибок в программе. Программа построена таким образом, чтобы вызываемые функции могли возвращать результат с ошибкой вызывающим функциям, а те могли в свою очередь “пробрасывать” эти результаты дальше.

file

Это модуль, содержащий функционал, относящийся к работе с файлом, которые содержит страницы. Этот модуль абстрагирован от конкретики задания и “знает” только о работе с файлом и существовании в нём страниц - он даже не “знает” ничего о содержимом этих страниц. Рассмотрим подробнее следующие классы:

file_manager

Этот класс ничего не знает о таблицах, страницах или чём-то ещё. По сути, этот класс является обёрткой над вызовами системного API (фуннкции вроде fread, fwrite…), предоставляя свой API для работы с файлом, соответствующий парадигме остальной программы

page_resolver

Этот класс всё ещё ничего не знает о таблицах. Он “оборачивает” file_manager, предоставляя API для работы со страницами - операции вроде “прочитать страницу по номеру” и “записать страницу по номеру”. При этом этот класс только реализует вычисления, связанные с доступом к страницами в файле, оставляя работу по выделению памяти на вызывающего

page_manager

Этот класс всё ещё ничего не знает о таблицах. Он “оборачивает” page_resolver, реализуя свой внутренний кэш для хранения в оперативной памяти загруженных страниц. Этот класс предоставляет API для получения страниц по номеру. В реализации page_manager будет искать страницу в своём кэше, и если не найдёт, то загрузит её через page_resolver, при этом выгрузив одну из страниц, уже находящихся в кэшэ.

storage

Этот модуль находится “над” модулем file, реализуя работу с “предметами”, хранящимися на страницах и группами страниц. Модуль storage знает содержимое страниц и предоставляет API для работы с “предметами”, хранящимися на них, но всё ещё абстрагирован от таблиц из задания.

page_group_manager

Этот класс реализует работу с группами страниц. Страницы в файле связаны между собой на подобие связного списка: каждая страница начинается с заголовка, который содержит номер следующей и предыдущей страниц. Группа страниц задатся номером первой страницы в этом списке.

Этот класс также реализует работу со “свободными” страницами - они тоже являются группой страниц. Операции по удалению группы или освобождению страниц, предоставляемые в API этого класса, добавляют страницы в эту группу. Операции по созданию группы или добавления страницы в группу удаляют страницы из этой группы,

или, если свободные страницы кончились, запрашивает создание новой страницы у page_manager.

page_data_manager

Этот класс реализует работу с предметами, расположенными на страницах (которые находятся в группе). Класс предоставляет API для добавления, чтения и удаления предметов из групп страниц. Этот класс ничего не знает о содержимом самих предметов.

database

Этот модуль реализует работу с реляционными таблицами, пользуясь API из модуля storage.

table_manager

Этот класс реализует работу с таблицами - операции по вставке, выборке, обновлению, удалению записей, а также операции по созданию и удалению таблиц.

database_manager

Этот класс реализует работу с запросами, которые уже вызывают операции из API table_manager.

Аспекты реализации

Обработка ошибок

Для обработки ошибок в программе используется следующая парадигма:

- Функции, которые могут возвращать ошибку, использует тип возврата result_t. Этот тип содержит значение RESULT_OK/RESULT_ERR и ссылку на объект ошибки, при её существовании.
- Функции, вызывающие процедуры, возвращающие тип result_t, оборачивают вызов в макросы TRY и CATCH, что позволяет среагировать на получение ошибки. Наиболее частый кейс использования представляет из себя освободить данные, использованные в функции, и пробросить ошибку выше.

Пример:

```
TRY(initialize_meta_page(self, meta_contents));
CATCH(error, {
 page_data_manager_destroy(page_data_manager);
 free(meta_contents);
 free(self);
 THROW(error);
```

Полиморфизм и наследование

В программе в ряде модулей используются принципы наследования и полиморфизма. Рассмотрим это на примере модуля выражений (expression)

Выражения используются в предикатах и запросах на обновление данных. Выражения позволяют представить литералы, значения из столбца записи, а также вычисленные из них значения - арифметические операции, операции сравнения, логические операции.

Пример:

```
struct predicate *where = predicate_of(expr_of(
   column_expr(TABLE_NAME(), STATUS_COL(), COLUMN_TYPE_BOOL),
   literal_expr((bool)true), comparison_operator(NEQ, COLUMN_TYPE_BOOL)));
```

Данный предикат выполнится, если значение в столбце STATUS_COL будет НЕ равно значению true.

Для реализации такой системы используется следущий подход:

Существует интерфейс, предоставляющий следующий API:

```
struct i_expression;

column_type_t expression_get_type(struct i_expression *self);
result_t expression_get(struct i_expression *self, struct record *record,
                        column_value_t *result);
struct i_expression *expression_clone(struct i_expression *self);
void expression_destroy(struct i_expression *self);
```

И существуют имплементации, предоставляющие следующий API для их создания:

```
struct i_expression *literal_expr_uint64(uint64_t value);
struct i_expression *literal_expr_int32(int32_t value);
struct i_expression *literal_expr_string(str_t value);
struct i_expression *literal_expr_bool(bool value);
struct i_expression *literal_expr_float(float value);

struct i_expression *column_expr(str_t table_name, str_t column_name,
                                 column_type_t column_type);

struct i_expression *expr_of(struct i_expression *first,
                             struct i_expression *second,
                             struct i_expression_operator
*expression_operator);
```

“Под капотом” интерфейс представляет из себя набор “общих” полей и полей для указателей на имплементации методов:

```
struct i_expression {
 column_type_t type;
 result_t (*get_impl)(struct i_expression *self, struct record *record,
                      column_value_t *result);
 struct i_expression *(*clone_impl)(struct i_expression *self);
 void (*destroy_impl)(struct i_expression *self);
};
```

Имплементации, в свою очередь, содержать родителя как поле, что позволяет использовать указатель на импелментацию как указатель на интерфейс - а это уже позволяет достичь полиморфизма:

```
struct literal_expression {
 struct i_expression parent;
 column_value_t value;
};

struct column_expression {
 struct i_expression parent;
 str_t table_name;
 str_t column_name;
};

struct operator_expression {
 struct i_expression parent;
 struct i_expression *first;
 struct i_expression *second;
 struct i_expression_operator *expression_operator;
};
```

Структура файла и страниц

Структура файла

Файл состоит из трёх частей: File Header, Application Header и страницы.

FIle Header

Про содержимое (и существование) заголовка файла знает класс page_resolver.

```
struct __attribute__((packed)) file_header {
 uint16_t format_type;
 uint32_t offset_to_data;
 uint64_t page_size;
 uint64_t page_amount;
};
```

Этот заголовок содержит следующую информацию:
format_type: магиечское число, определяющее, что файл соответсвует ожидаемому формату. В этом проекте используется число 0xB0BA

offset_to_data: указывает offset до начала страниц
page_size: указывает размер страницы
page_amount: указывает число страниц в файле

Application Header

Про содержимое этого заголовка знает класс page_group_manager.

```
struct __attribute__((packed)) application_header {
 page_id_t meta_page;
 page_id_t first_free_page;
 page_id_t last_free_page;
};
```

Этот заголовок содержит следующую информацию:
meta_page: номер первой страницы в meta-группе
first_free_page: номер первой свободной страницы
last_free_page: номер последней свободной страницы

Страницы

После этих заголовков идут страницы. Они хранятся в файле друг за другом и определяются номером (page_id_t).

Структура страницы

Каждая страница состоит из трёх частей: Page Header, Page Data Header и данные

Page Header

Про содержимое этого заголовка знает класс page_group_manager.

```
struct __attribute__((packed)) page_header {
 page_id_t previous;
 page_id_t next;
 uint8_t contents[];
};
```

Этот заголовок содержит следующую информацию:
previous: номер предыдущей страницы в группе
next: номер следующей страницы в группе
contents: содержимое страницы - представлено в качестве free array member’a.

Page Data Header

Про содержимое этого заголовка знает класс page_data_manager.

```
struct __attribute__((packed)) page_data_header {
 uint16_t item_amount;
 page_index_t free_space_start;
 page_index_t free_space_end;
```

```
 uint8_t contents[];
};
```
Этот заголовок содержит следующую информацию:
item_amount: число предметов, лежащих на этой странице
free_space_start: индекс начала свободного места на странице
free_space_end: индекс конца свободного места на странице
contents: содержимое страницы - представлено в качестве free array member'a.

Хранение предметов на странице

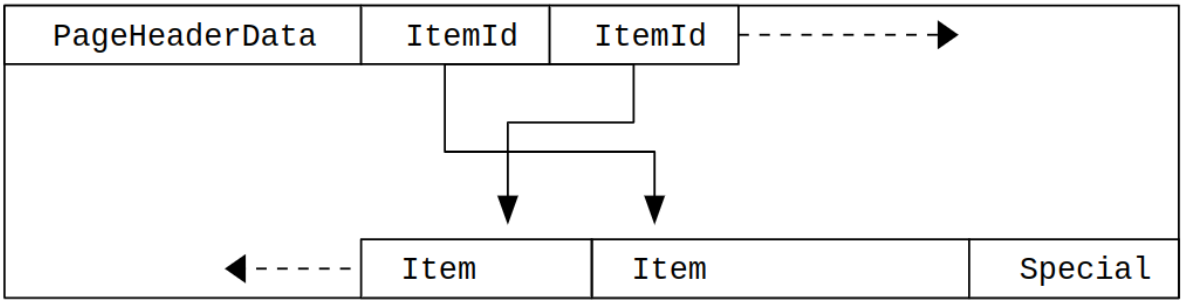
Предметы на странице хранятся следующим образом:

С начала содержимого страницы расположены следующие структуры:

```
struct page_item_id_data {
 page_index_t item_offset;
 page_index_t item_size;
 uint16_t flags;
};
```
Эти структуры имеют постоянный размер и определяют размер соответствующего предмета и его offset от начала страницы.

Сами данные предмета распологаются начиная с конца страницы по порядку.

То есть получается примерно следующая картина:



(картинка взята из документации по postgresql)

В моей реализации отсутствует блок Special в конце, но идея расположения предметов и их идентификаторов аналогична.

Результаты

Артефакты

В результате сборки программы создаются следующие артифакты:

- Файл библиотеки, предназначенный для линковки с пользовательской программой.
- Исполняемые файлы тестов, линкующиеся с файлом библиотеки

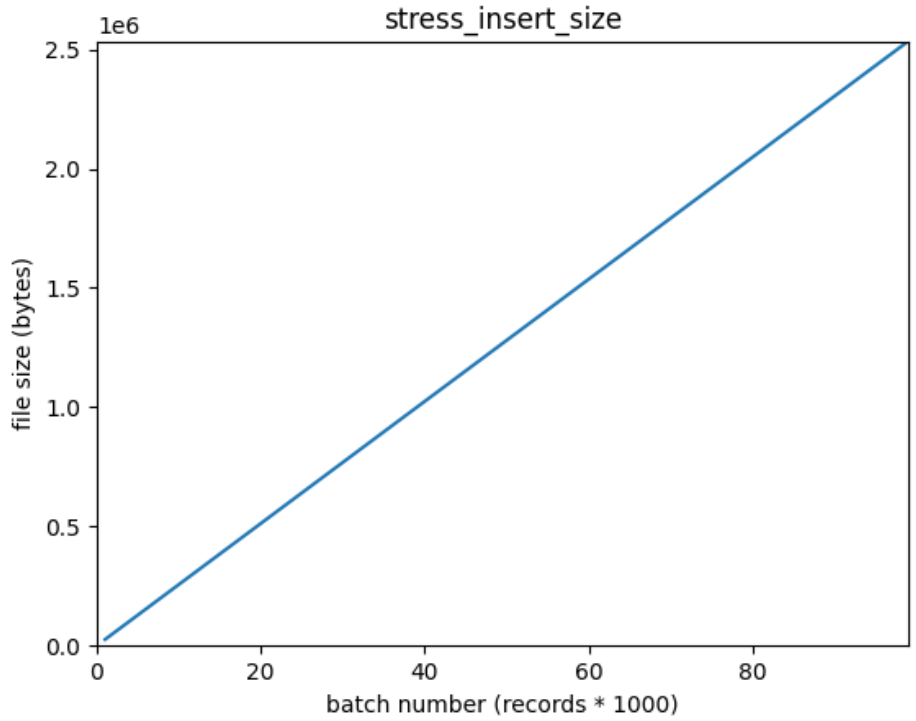
В результат запуска benchmark-тестов будет также создан набор графиков, отражающих время работы теста и размер файла с данными по его окончанию. Эти графики будут предоставлены ниже.

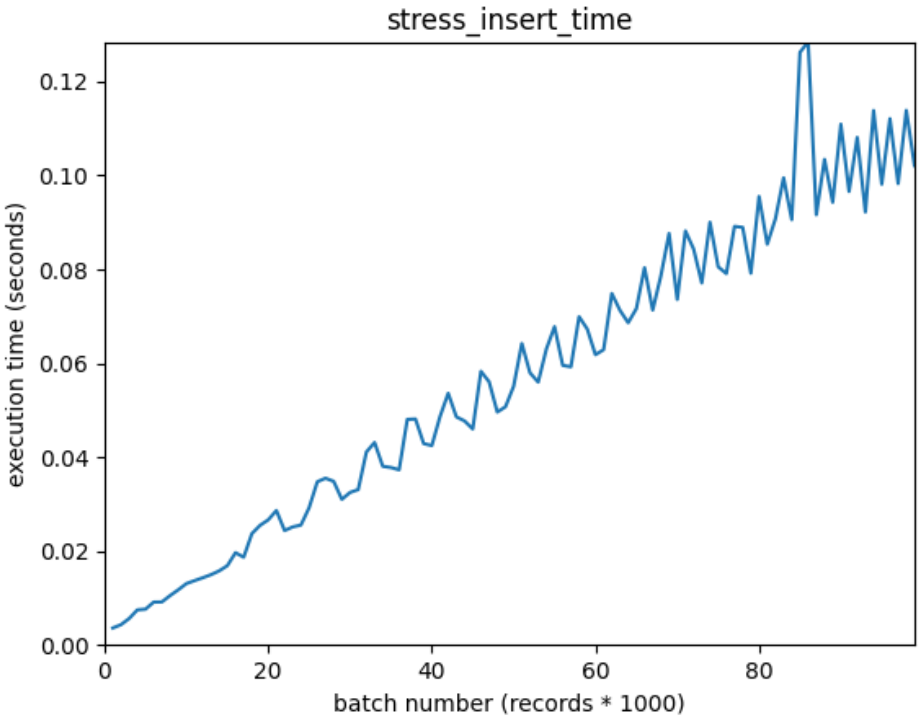
Результаты тестов

Для каждого теста будут представлены 2 графика. Первый график отражает размер файла относительно количества записей N. Второй график отражает время действия программы относительно количества записей N.

Вставка N записей

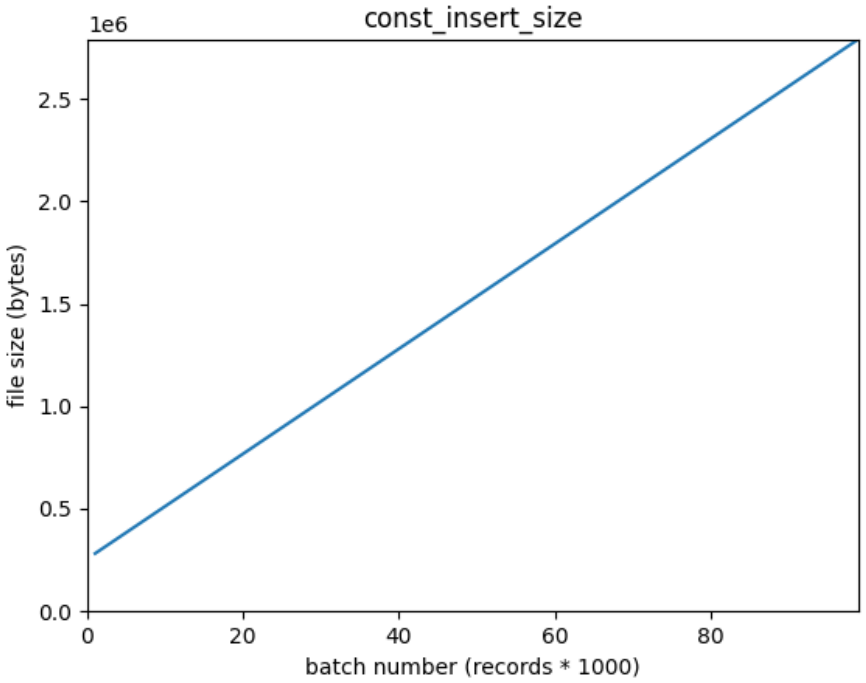
Данный тест выполняет создание файла данных и вставку в него N записей. Он показывает, что время вставки набора записей пропорционально числу этих записей.

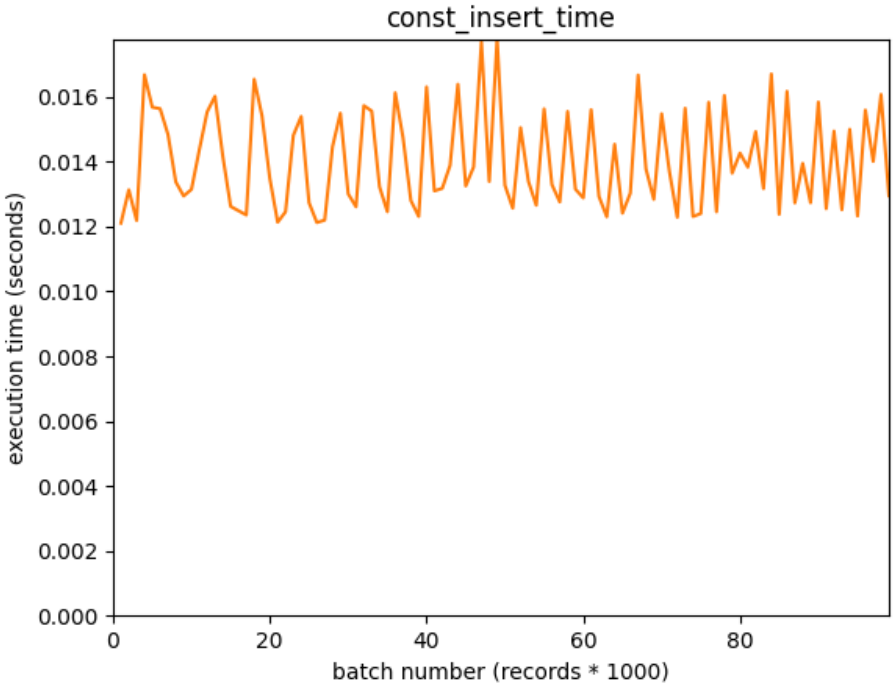




Вставка M записей в файл с N записями

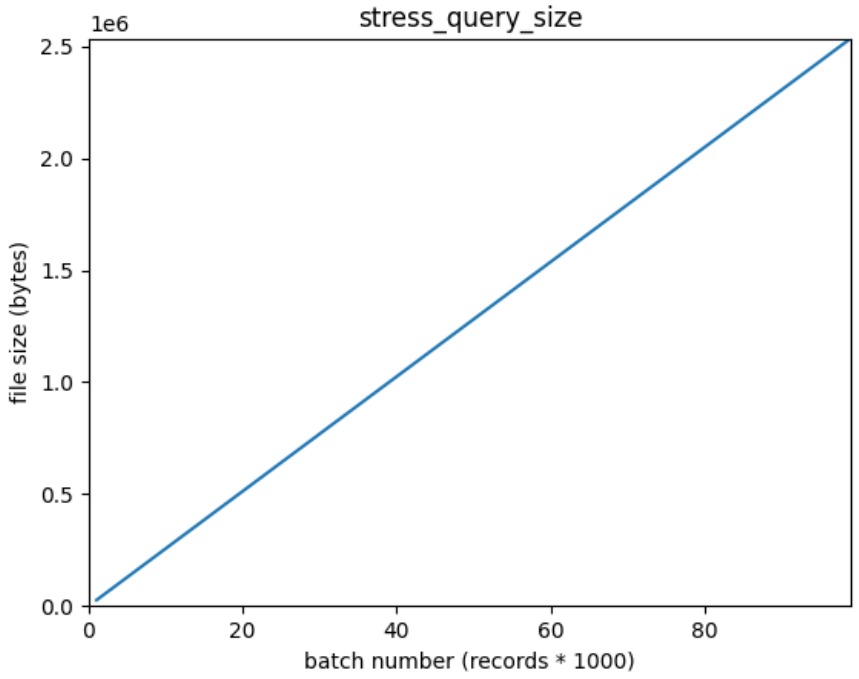
Данный тест выполняет вставку константного числа M записей в файл, уже содержащий N записей. Он показывает, что время вставки некоторого числа записей в файл не зависит от числа записей, уже содержащихся в нём

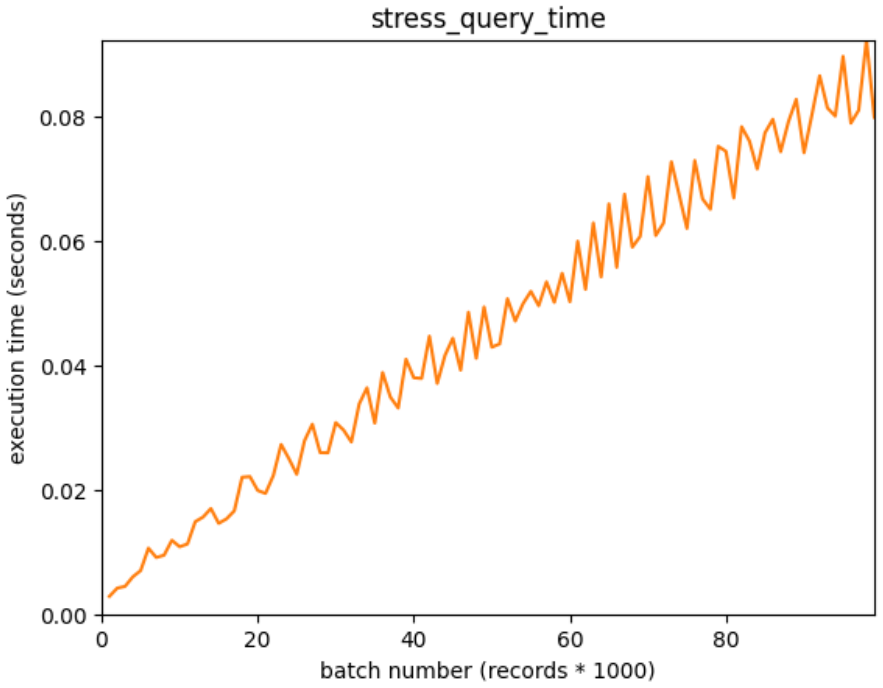




Выборка N записей

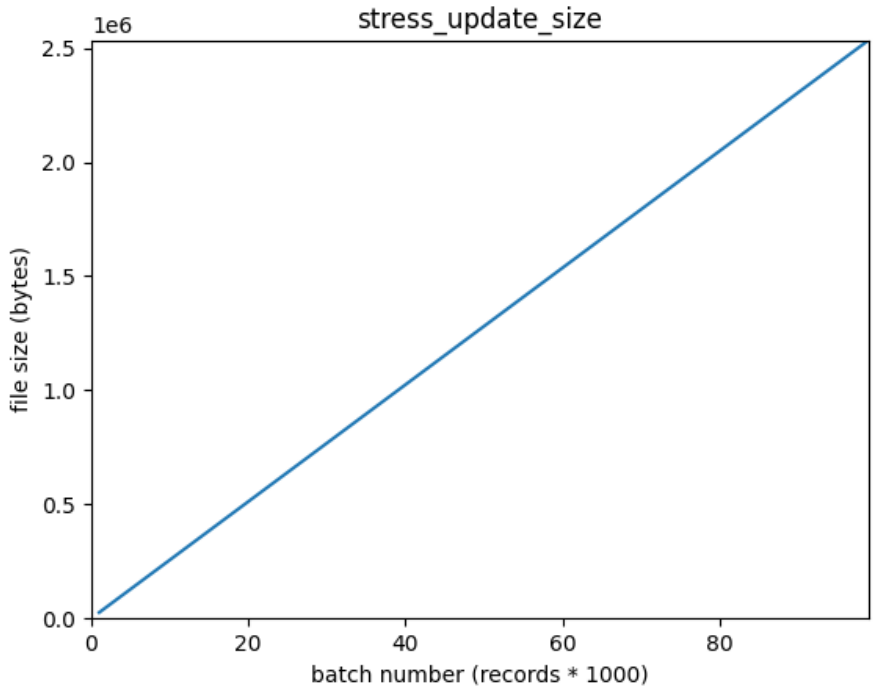
Данный тест выполняет выборку из файла, содержащего N записей в рассматриваемой таблице, по условию. Он показывает, что время выборки записей по условию пропорционально общему числу записей в таблице.

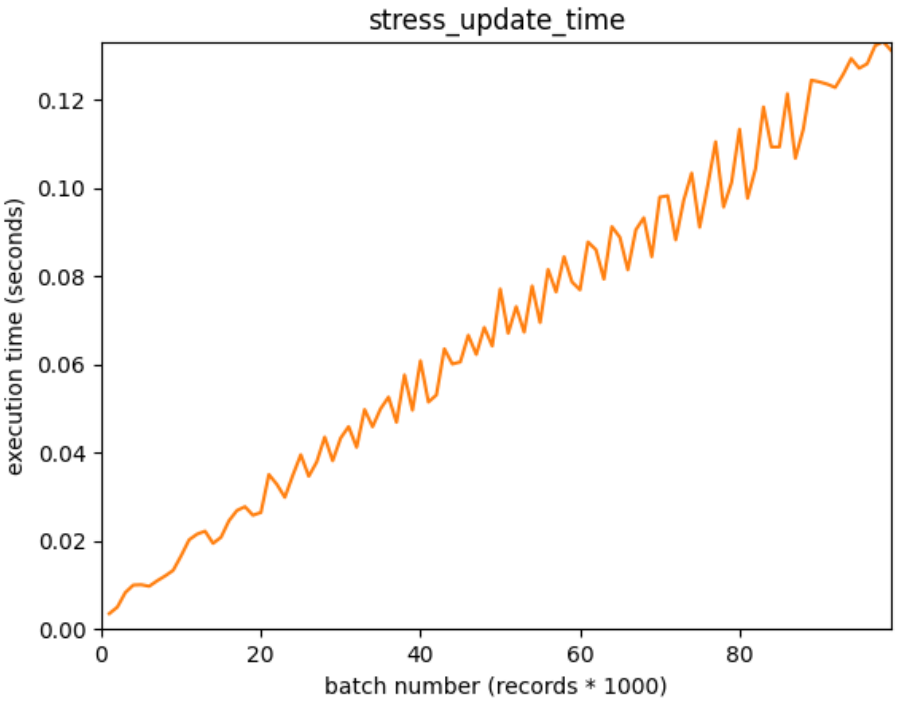




Обновление N записей

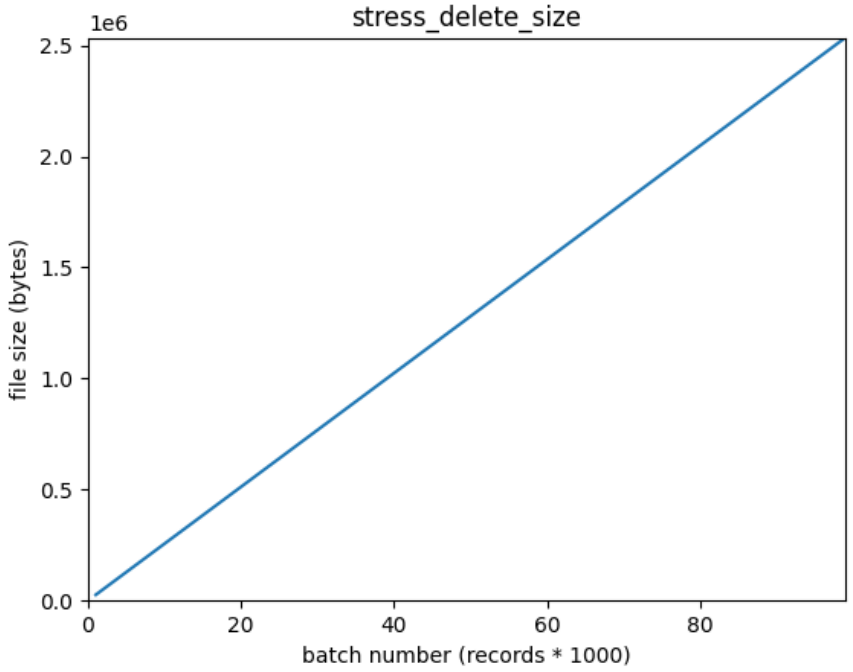
Данный тест выполняет обновление в файле, содержащем N записей в рассматриваемой таблице, по условию. Он показывает, что время обновления по условию пропорционально общему числу записей в таблице.

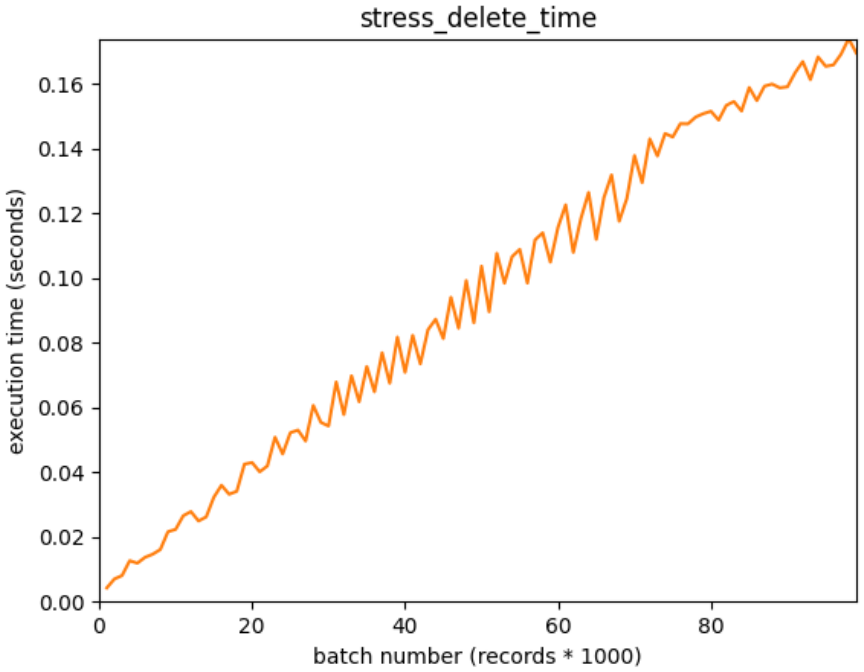




Удаление N записей

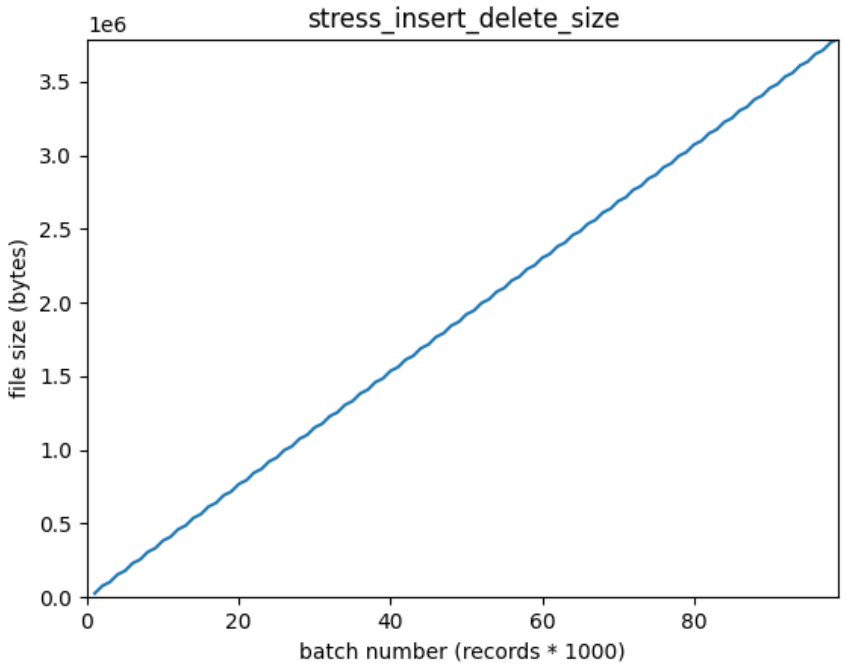
Данный тест выполняет удаление в файле, содержащем N записей в рассматриваемой таблице, по условию. Он показывает, что время удаления по условию пропорционально общему числу записей в таблице.





Вставка-удаление записей

Данный тест выполняет вставку N записей в таблицу, удаление половины из них, и вставку N/2 записей после. Цель этого теста показать, что после таких операций размер файла пропорционален получившимуся числу записей в нём.



Выводы

В результата выполнения задания был создан модуль, реализующий хранение, доступ и модификацию информации в файле. По результатам тестов можно судить, что временная сложность выполнения системой запросов соответствует требуемой. Размеры файла амортизированно пропорциональны размеру данных в нём.

В ходе выполнения данного задания я научился проектировать с нуля архитектуру приложения на языке C и научился пользоваться парадигмами полиморфизма, наследования и инкапсуляции в контексте языка C.