Лабораторная работа 3. Потоки.

Цели работы: изучение методов параллельного программирования с использованием потоков.

1 Теоретическая часть

1.1 Определения

Активный участок кода — участок кода, который либо выполняется в данный момент, либо ожидает разрешения на выполнение от планировщика.

Поток выполнения — системная сущность, соответствующая некоторому активному участку кода программы. Потоки выполнения одного процесса существуют в одном адресном пространстве и потому не изолированы друг от друга.

Общий ресурс — ресурс (переменная, файл, системный объект), к которому имеют доступ несколько субъектов (потоков или обработчиков сигналов).

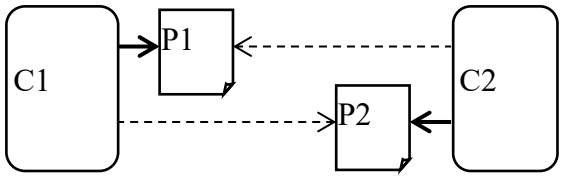
Состояние гонки — ситуация, при которой корректность работы программы зависит от того, когда и в каком порядке субъекты выполняют определенные действия.

Гонка данных — состояние гонки, вызванное доступом субъектов к общему ресурсу.

Критическая секция — участок кода, в котором происходит доступ к общему ресурсу.

Синхронизация — меры, направленные на устранение состояний гонки.

Взаимоблокировка (deadlock)— ситуация, в которой субъекты C1 и C2, получившие исключительный доступ к ресурсам P1 и P2 соответственно, при этом пытаются получить доступ к ресурсам P2 и P1 для продолжения выполнения. Поскольку ни один из субъектов не может получить необходимый ресурс, дальнейшая работа невозможна.



Блокировка (Lock) – класс примитивов синхронизации, используемых для ограничения доступа к общему ресурсу.

Семафор — блокировка, обеспечивающая доступ к ресурсу не более чем N субъектам в каждый момент времени.

Мьютекс — блокировка, предоставляющая доступ к общему ресурсу не более чем 1 субъекту.

Циклическая блокировка — аналог мьютекса, основанный на активной проверке статуса блокировки (в цикле). В отличие от семафора и мьютекса, при неудачной попытке захвата циклическая блокировка не приостанавливает поток до разблокировки, а постоянно проверяет статус блокировки. Выгоднее, чем мьютекс, в случае интенсивной работы с ресурсом и малом времени ожидания.

Барьер – примитив синхронизации, блокирующий выполнение потока до тех пор, пока N потоков не достигнут определенной точки выполнения.

Условная переменная (переменная состояния) – примитив синхронизации, предоставляющий возможность уведомления одного или нескольких потоков о достижении определенного условия.

1.2 Полезные системные вызовы и библиотечные функции

1.2.1 Подключение библиотеки Pthreads в CMake:

В CMakeLists.txt нужно указать следующие строки:

```
find_package(Threads REQUIRED)
link_libraries(Threads::Threads)
```

1.2.2 Поведение функций библиотеки Pthreads при возникновении ошибок

В отличие от функций стандартной библиотеки языка C и системных вызовов функции из Pthreads не используют переменную errno для передачи информации об ошибке. *Вместо этого (если не указано иное), данные функции возвращают 0 в случае успешного завершения, и непосредственно код ошибки – в случае неудачного завершения.*

1.2.3 Потоки

1.2.3.1 Создание потоков

Потоки создаются функцией `pthread_create`:

```
#include <pthread.h>

/*Создать новый поток*/
int pthread_create(
      pthread_t *thread                //результат
    , const pthread_attr_t *attr       //атрибуты нового потока
    , void *(*start_routine) (void *) //стартовая функция потока
    , void *arg                        //аргумент для start_routine
);
```

Параметр `thread` является указателем на переменную в которую будет сохранен дескриптор созданного потока.

Параметр `attr` должен указывать на структуру, содержащую атрибуты создаваемого потока (см. *`man pthread_attr_init`*). Для создания потока с атрибутами по умолчанию в качестве значения этого параметра можно передать NULL.

Параметр `start_routine` должен указывать на стартовую функцию потока. Стартовая функция для потока является аналогом `main` для процесса, т. е. поток завершается, когда завершается выполнение стартовой функции. Функция, выступающая в роли стартовой, должна принимать в качестве аргумента указатель на аргумент функции и возвращать указатель на результат. Поскольку и результат, и аргумент могут быть любого типа, оба указателя имеют тип `void*` и должны явно приводиться к требуемому типу. Функция может не использовать свой аргумент, но сам аргумент должен быть указан в сигнатуре функции. Если функция не возвращает никакого значимого результата, она должна вернуть NULL.

Для передачи данных в функцию, указанную в `start_routine`, используется аргумент `arg`. Если известно, что `start_routine` не нуждается в аргументах, данный аргумент может иметь значение NULL.

1.2.3.2 Завершение потоков

Поток завершается если завершается его функция `start_routine`. Досрочно завершить работу потока можно вызовом `pthread_exit`:

```
#include <pthread.h>

void pthread_exit(void *retval); //завершить поток
```

Параметр `retval` должен содержать указатель на результат работы потока (аналогично возвращаемому значению `start_routine`) либо NULL.

Замечание 1: вызов `exit` или `_exit` в любом из потоков процесса завершит весь процесс и все его потоки.

Замечание 2: если вызвать `pthread_exit` в главном потоке (например, в функции `main`), то главный поток процесса будет завершен, но main будет считаться незавершенной. Как следствие, процесс в целом будет считаться «живым», пока не завершатся оставшиеся потоки (если таковые есть).

Помимо нормального завершения потока, поток может быть завершен другим потоком вызовом `pthread_cancel`:

```
#include <pthread.h>

//послать потоку запрос на завершение
int pthread_cancel(pthread_t thread);
```

Вызов принимает в качестве параметра дескриптор потока. Данный вызов посылает запрос на завершение. По умолчанию, по получении данного запроса, поток будет завершен. Данное поведение может быть изменено (см. *`man pthread_setcancelstate`*).

В случае завершения потока из-за `pthread_cancel`, его результатом является константа `PTHREAD_CANCELED`.

1.2.3.3 Ожидание завершения потока

Дождаться завершения потока и получить результат его работы можно вызовом `pthread_join`:

```
#include <pthread.h>

//подождать завершения потока и получить результат работы
int pthread_join(pthread_t thread, void **retval);
```

Функция возвращает -1 в случае ошибки.

Первым аргументом является дескриптор потока.

Вторым аргументом `retval` является указатель на переменную, в которую будет помещен указатель на результат работы потока (помните, что функция потока возвращает `void*` - указатель непосредственно на результат либо NULL).

Если поток был завершен вызовом `pthread_cancel`, по адресу `retval` будет записана константа PTHREAD_CANCELED, которая гарантированно является невалидным указателем.

1.2.4 Синхронизация

1.2.4.1 Volatile

Ключевое слово `volatile` инструктирует компилятор отказаться от оптимизаций, связанных с доступом к переменной, помеченной данным ключевым словом. Если переменная, доступ к которой из нескольких потоков производится без использования блокировок, то она должна быть помечена, как `volatile` (например `volatile bool flag`, пример, см. метки L3 и L16).

1.2.4.2 Примитивы синхронизации и барьеры памяти

И компилятор, и процессор могут переупорядочивать выполнение операций чтения-записи, что может приводить к весьма печальным последствиям в многопоточных программах.

Если доступ к переменной защищен блокировкой, то компилятор сгенерирует код, гарантирующий доступ к переменной в корректном порядке. В этом случае говорят, что функции доступа устанавливают барьер памяти.

Как следствие, если общий ресурс является составным объектом (например, контейнером STL или просто структурой из нескольких полей) и/или над общим ресурсом выполняются составные операции – общий ресурс должен быть защищен примитивом синхронизации.

1.2.4.3 Мьютексы

Мьютекс используются для предоставления эксклюзивного доступа к общему ресурсу (т.е. только 1 поток имеет доступ к ресурсу).

Мьютекс имеет 2 возможных состояния: «захвачен» и «свободен». Попытка захвата «занятого» мьютекса приводит к блокировке потока до освобождения мьютекса. Как следствие, максимум 1 поток «владеет» мьютексом в каждый момент времени.

```
#include <pthread.h>

//инициализировать мьютекс
int pthread_mutex_init(pthread_mutex_t *mutex,
                const pthread_mutexattr_t *mutexattr);

//захватить мьютекс
int pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mutex);

//попытаться захватить мьютекс, если провал - результат==EBUSY
int pthread_mutex_trylock(pthread_mutex_t *mutex);

//освободить мьютекс
int pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mutex);

//уничтожить мьютекс
int pthread_mutex_destroy(pthread_mutex_t *mutex);
```

Вызовы возвращают -1 при ошибке.

Функкции `pthread_mutex_init` и `pthread_mutex_destroy` являются аналогами конструктора и декструктора. Дополнительно в `pthread_mutex_init` в параметре `mutexattr` передается указатель на атрибуты создаваемого мьютекса либо NULL, если требуется создать мьютекс с атрибутами по умолчанию.

1.2.4.4 Циклические блокировки

Если время работы критической секции мало, а работа с общим ресурсом идет очень интенсивно, то вместо мьютекса выгоднее использовать циклическую блокировку. Название данная блокировка имеет из-за обычного внутреннего цикла, который проверяет статус блокировки в ожидании ее освобождения. Данный цикл неэффективно расходует процессорное время, т. к. процесс не приостанавливается в ожидании уведомления об освобождении блокировки, как в случае мьютекса, семафора и пр., а активно ждет. Отдельного примера работы с циклическими блокировками нет, т. к. они идентичны мьютексам.

```
#include <pthread.h>

//инициализировать блокировку
int pthread_spin_init(pthread_spinlock_t *lock, int pshared);

//захватить блокировку
int pthread_spin_lock(pthread_spinlock_t * lock);

//попытаться захватить блокировку, если провал - результат==EBUSY
int pthread_spin_trylock(pthread_spinlock_t * lock);
```

```
//освободить блокировку
int pthread_spin_unlock(pthread_spinlock_t * lock);

//уничтожить блокировку
int pthread_spin_destroy(pthread_spinlock_t * lock);
```

Назначение функций и их применение аналогичны сходным функциям мьютекса. Параметр `pshared` используется, если циклическая блокировка используется для синхронизации потоков из разных процессов. В рамках лабораторной он должен быть равен 0.

1.2.4.5 Барьеры

Барьеры представляют возможность дождаться достижения N протоками определенной точки выполнения.

```
#include <pthread.h>

//инициализировать барьер
int pthread_barrier_init(pthread_barrier_t *barrier,
    const pthread_barrierattr_t *attr, unsigned int count);

//заблокироваться на барьере и дождаться остальных потоков
int pthread_barrier_wait(pthread_barrier_t *barrier);

//уничтожить барьер
int pthread_barrier_destroy(pthread_barrier_t *barrier);
```

При инициализации барьера в параметре `count` указывается количество потоков, которые предполагается синхронизировать.

Вызов `pthread_barrier_wait()` блокирует вызывающий поток до тех пор, пока другие `count-1` потоков не вызовут эту функцию над той же переменной-барьером. Функция возвращает 0 в `count-1` потоках и константу `PTHREAD_BARRIER_SERIAL_THREAD` – в 1 из них (заранее неизвестно, в каком конкретно). Обычно (но не обязательно) данный поток выполняет финальное действие – например, объединяет результаты работы остальных потоков и вычисляет финальный результат.

После того, потоки разблокируются, барьер сбрасывается и снова становится пригоден для использования – нет необходимости заново его инициализировать.

1.2.4.6 Условные переменные

Условные переменные предназначены для уведомления одного или нескольких потоков о выполнении некоторого условия.

```
#include <pthread.h>

//инициализирвоать условную переменную
int pthread_cond_init(pthread_cond_t *cond,
                      pthread_condattr_t *cond_attr);

//разблокировать один из ожидающих потоков
int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cond);

//разблокировать все ожидающие потоки
int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cond);

//дождаться разблокировки
int pthread_cond_wait(pthread_cond_t *cond
                    , pthread_mutex_t *mutex);

//подождать разблокировки до указанного времени,
//если не разблокировались - errno==ETIMEDOUT
int pthread_cond_timedwait(pthread_cond_t *cond
                         , pthread_mutex_t *mutex
                         , const struct timespec *abstime);

//уничтожить условную переменную
int pthread_cond_destroy(pthread_cond_t *cond);
```

Условные переменные обычно предназначены для работы с неким общим ресурсом, обработку которого требуется производить только при определенном условии (например, общим ресурсом является std::vector, обработку которого нужно производить, только если в нем что-то есть).

В простом случае есть 1 поток, который подготавливает данные для обработки, и N потоков, которые обрабатывают данные. Поскольку данные являются общим ресурсом, доступ к ним должен защищаться блокировкой. При использовании условных переменной в виде блокировки необходимо использовать мьютекс.

Поток-обработчик:

1) захватывает мьютекс и входит в критическую секцию;
2) проверяет наличие данных для обработки (проверка условия), если есть - *goto 5*;
3) вызывает `pthread_cond_wait()`;
4) после разблокировки опять проверяет наличие данных (проверка условия), если нет – *goto 3*;

5) забирает свою часть данных и разблокирует мьютекс;

6) обрабатывает данные.

Поток-источник данных:

1) подготавливает данные для обработки;

2) захватывает мьютекс и входит в критическую секцию;

3) записывает данные в доступное для всех потоков хранилище (общий ресурс);

4) разблокирует один (`pthread_cond_signal`) или все (`pthread_cond_broadcast`) потоки-обработчики;

5) разблокирует мьютекс.

На время выполнения `pthread_cond_wait()` указанный мьютекс временно разблокируется до момента срабатывания переменной, однако перед выходом из функции поток захватывает мьютекс, т.е. с точки зрения потока он никогда не терял блокировку.

Вызов `pthread_cond_broadcast()` разблокирует все ожидающие потоки-обработчики, однако мьютекс, связанный с общим ресурсом, потоки повторно захватывают по одному -> остаток критической секции потоки тоже выполняют по одному (порядок заранее не известен).

2 Задание на лабораторную работу.

Написать программы с использованием примитивов синхронизации согласно варианту.

Общее условие: преподавателем выдается файл или несколько файлов с данными. Программа должна прочитать данные из файла(-ов), обработать данные *последовательно* и *параллельно* и вывести *результаты и время обработки*. Если результат для последовательного и параллельного случая не совпадает – обосновать причину расхождения.

Файлы содержат данные в бинарном формате (т.е. их необходимо читать/записывать без всякого парсинга и обработки). Предполагается, что вы умеете определять размер файла и заранее подготавливать буфер соответствующего размера.

Помните, что функцию `sleep()` и ей подобные нельзя использовать *для синхронизации*.

Задание 1. Написать программу, выполняющую умножение матриц. Преподавателем выдается 4 файла – 2 малые и 2 большие матрицы из чисел типа double. Матрицы гарантированно являются квадратными – размер матрицы можно (и нужно) вычислить из размера файла.

Демонстрацию корректности работы алгоритма проводить для малых матриц (не более 10x10) с выводом результата на экран.

Данную задачу необходимо решить без использования отдельных примитивов синхронизации.

Задание 2. Написать программу, выполняющую заданную операцию редукции над массивом чисел типа int. В качестве примитива синхронизации использовать барьер. Схему операции редукции смотрите в приложении 1.

Вариант	**Операция**
1	Суммирование
2	Поиск максимума
3	Поиск минимума

Задание 3 (легкий уровень). Написать программу, выполняющую поиск заданного значения в массиве элементов типа int. Результатом является индекс элемента в массиве либо -1. Если элементов с таким значением несколько – вернуть индекс **X** вхождения. В качестве примитива синхронизации использовать **Y**. В качестве общего ресурса использовать переменную типа `long long`.

Вариант	X	Y
1	первого	мьютекс
2	первого	циклическую блокировку
4	последнего	мьютекс
5	последнего	циклическую блокировку

Задание 3 (средний уровень). Написать программу, выполняющую поиск элементов с заданным значением в массиве элементов типа int. Результатом являются индексы всех элементов с заданным значением в порядке **X**. В качестве примитива синхронизации использовать **Y**. В качестве общего ресурса использовать любой контейнер из STL или самописный контейнер.

Вариант	X	Y
1	возрастания	мьютекс
2	возрастания	циклическую блокировку
3	убывания	мьютекс
4	убывания	циклическую блокировку

Задание 3 (сложный уровень). Написать шаблон класса потокобезопасной очереди сообщений `threadsafe_queue<T>`. Примитивы синхронизации – мьютекс и условная переменная. Полезно вспомнить про блокировку с двойной проверкой.

Интерфейс класса должен предоставлять, *как минимум*, следующий набор операций:

```
template <typename T>
class mt_queue{
public:
    // создание очереди с указанием макс. размера
    mt_queue(size_t max_size);

    // уничтожение очереди
    ~mt_queue();

    // запись в очередь (если очередь заполнена – блокировка до
    // появления места)
    void enqueue(const T& v);

    // чтение из очереди (если очередь пуста – блокировка до
    // появления новых элементов)
    T dequeue();

    // проверки на наличие/отсутствие элементов
```

```
    bool full() const;
    bool empty() const;

    // чтение/запись без блокировки
    std::optional<T> try_dequeue();
    bool try_enqueue(const T& v);
};
```

Для простоты можно запретить копирование и перемещение очереди с помощью удаления соответствующих конструкторов. Если конструкторы не удалены – написать их с сохранение потокобезопасности.

```
mt_queue(const mt_queue&) = delete;// запрет копирования
mt_queue(mt_queue&&) = delete;     // и перемещения
```

Продемонстрировать работу с M потоками-писателями и N потоками-обработчиками. Способ демонстрации – на усмотрение студента. Самый простой способ – писатели пишут в очередь числа, читатели распечатывают числа из очереди (при этом порядок распечатанных элементов может отличаться от исходного, но сама очередь может работать корректно – если такое наблюдается, обосновать).

Поскольку для потока-читателя «пустая» очередь не гарантирует, что позже сообщения не появятся, необходимо использовать некоторый способ уведомления о том, что новых сообщений не будет. Данная задача может решаться и вне класса `threadsafe_queue<T>` (отдельная переменная, сигнал, сообщение со специальным значением и пр.). Итоговый способ реализации также остается на усмотрение студента.

Приложение А. Редукция массива

Редукция – сведение набора из нескольких элементов к одному посредством заданной бинарной операции.

Примером редукции является нахождение суммы элементов массива, поиск максимума/минимума, поиск заданного числа в массиве и т.д.

Редукция может быть эффективно реализована в системе с параллельным выполнением посредством следующей схемы:

ДАНО

– количество потоков `N`;

– массив `ARR` размера `SIZE>N`;

– бинарный оператор `OP(x, y)`.

РЕШЕНИЕ:

1. Выделить массив `RESULT` размером N;
2. Инициализировать барьер;
3. Разделить `ARR` на `N` частей, ARR_0 ,…, ARR_{N-1};
4. Запустить потоки;

В функции потока `i`:

1. Выполнить редукцию части ARR_i обычным способом, результат записать в `RESULT[i];`
2. `step = N`;
3. Синхронизироваться по барьеру;
4. Если `step == 1`, завершить поток;
5. `p = step`;
6. `step = ⌈step/2⌉`;
7. Если `i+step >= p`, goto 3;
8. `RESULT[i] = OP(RESULT[i], RESULT[i+step])`;
9. goto 3;

5. Дождаться завершения всех потоков, результат будет в `RESULT[0]`;