Министерство образования и науки Российской Федерации

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Основы параллельного программирования

Отчет по лабораторной работе № 1

«Параллельная реализация решения системы линейных алгебраических уравнений с помощью OpenMP»

Студент: Зверев Андрей, гр. 23206
Преподаватель: Мичуров Михаил Антонович

Новосибирск, 2025 г.

1. Цель работы

1. Последовательную программу,
реализующую итерационный алгоритм решения системы линейных алгебраических уравнений вида Ax=b, распараллелить с помощью OpenMP. Реализовать два варианта программы:

- Вариант 1: для каждого распараллеливаемого цикла создается отдельная параллельная секция #pragma omp parallel for,
- Вариант 2: создается одна параллельная секция #pragma omp parallel, охватывающая весь итерационный алгоритм.

Уделить внимание тому, чтобы при запуске программы на различном числе OpenMP-потоков решалась одна и та же задача (исходные данные заполнялись одинаковым образом).

2. Замерить время работы двух вариантов программы при использовании
различного числа процессорных ядер: от 1 до числа доступных в узле.
Построить графики зависимости времени работы программы, ускорения и эффективности распараллеливания от числа используемых
ядер. Исходные данные и параметры задачи подобрать таким образом, чтобы решение задачи на одном ядре занимало не менее 30 секунд.

3. Провести исследование на определение оптимальных параметров
#pragma omp for schedule(...) при некотором фиксированном размере задачи и количестве потоков.

4. На основании полученных результатов сделать вывод о целесообразности использования первого или второго варианта программы.

2. Описание работы

1) Реализация программы решения СЛАУ

Для решения СЛАУ я выбрал метод простой итерации, в котором тау я выбирал динамически, в зависимости от N. Для проверки работоспособности и правильности работы я выполнил первый из предложенных вариантов - модельную задачу с заданным решением. Проверил правильность работы на маленьких данных (размерах N), выводя полностью вектор решений. Затем уменьшил вывод до 4-х значений из вектора решений X по индексам 0, N/3, N/2, N-1. Листинг этой программы предоставлен Приложении 1.

2) Распараллеливание программы двумя методами

Для распараллеливания я использовал программу, реализованную в п.1 и OpenMP. В первом варианте параллельной программы я распараллелил каждый цикл с помощью *#pragma omp parallel for*, заранее установив количество потоков в начале программы (вводится пользователем). Во втором варианте программы я распараллелил только главный цикл программы в функции *isgoodSolve,* также использовал *#pragma omp single* (что указывает на выполнение блока кода только одним процессом) на перерасчет данных (поиск x(n+1)). Также пришлось изменить функцию *isGoodSolve* так, чтобы распараллеливание было эффективно (в моем варианте программы одно ядро выполняло все задачи, что приводило к простаиванию остальных и увеличению времени работы). Листинги программ представлены в Приложениях 2, 3 соответственно.

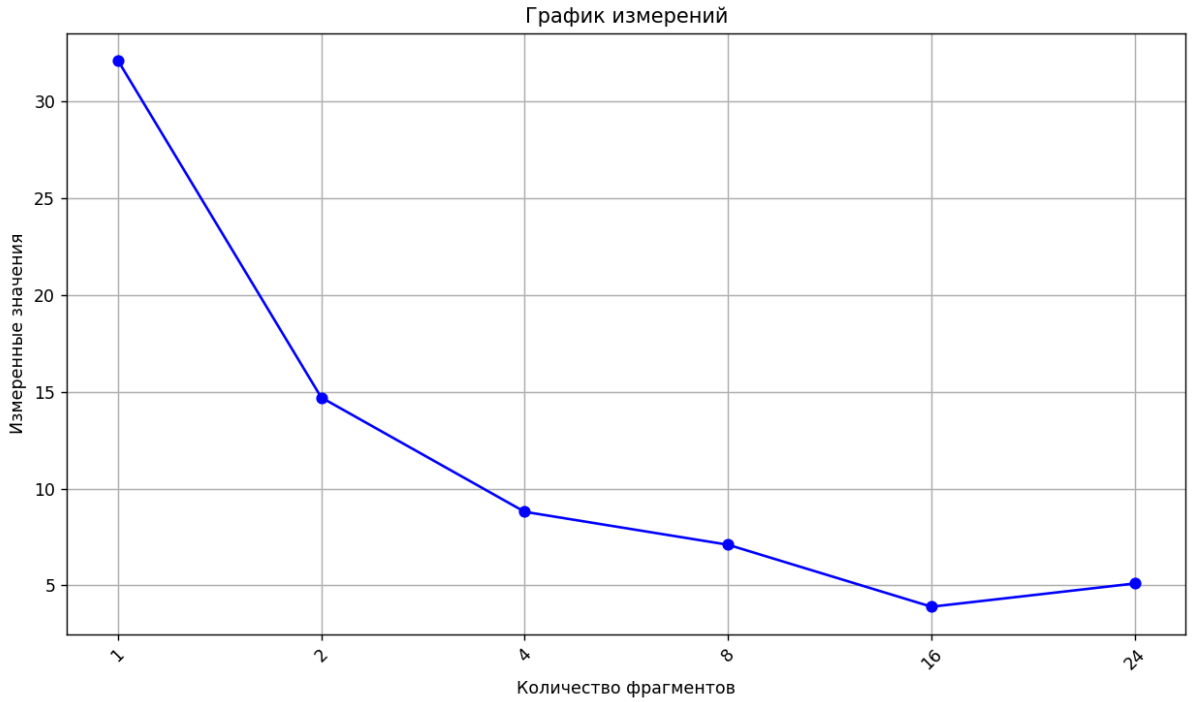
3) Использование сервера и замер времени, сбор данных

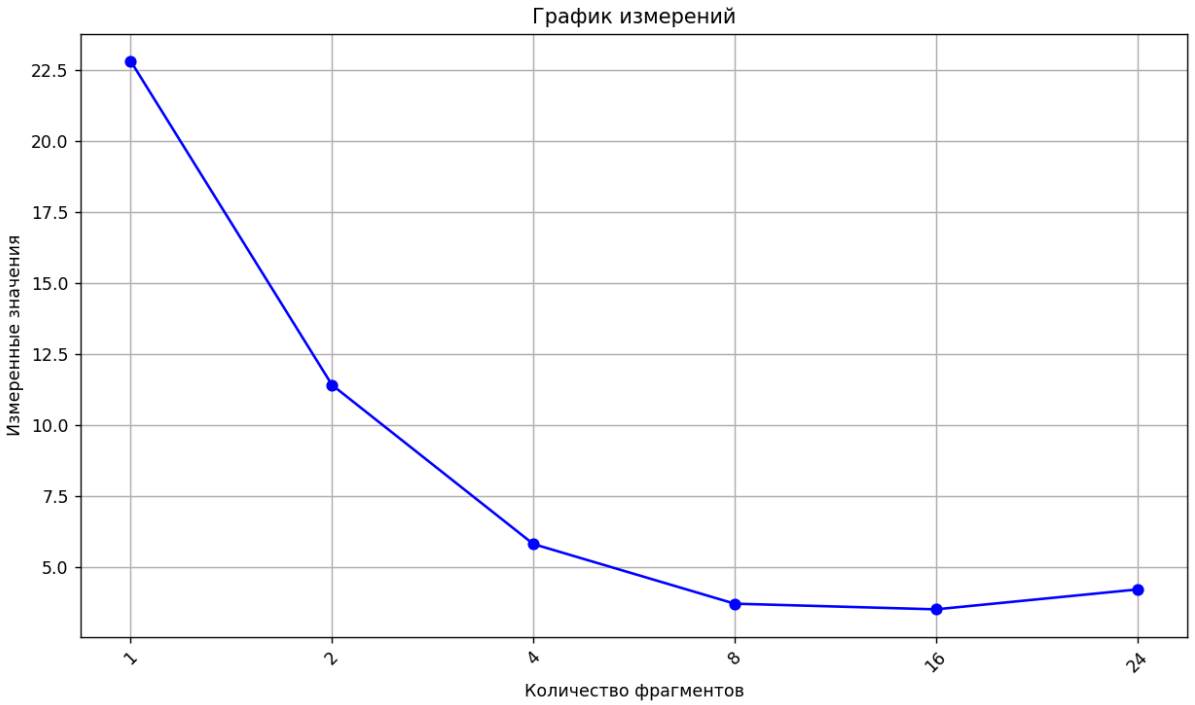
Для проведения измерений я использовал кафедральный сервер и его вычислительные мощности. Для компиляции файлов я написал bash-скрипт, компилирующий с помощью g++ сразу 3 файла. (Приложение 4). Для построения графиков использовал программу на python. (Приложение 5)

Начальные данные N=4000, T=1. Время выполнения для них составило 32 секунды. Далее количество потоков увеличивалось по

степеням двойки (1,2,4,8,16,24). 24 - максимально доступное количество.
Ниже представлены графики и данные замеров.
Для первого варианта программы: 32.1 14.7 8.8 7.1 3.9 5.1
Для второго варианта программы: 22.8 11.4 5.8 3.7 3.5 4.2

Графики:





4) Поиск наилучших параметров schedule

Для поиска наилучших параметров была немного переписана распараллеленная программа первого варианта, чтобы при компиляции было удобно подставлять переменные окружения. (Приложение 6) За исходные данные выбраны N=3000 T=4. SHUNK_SIZE были выбраны: 10, 50, 100. Полученные результаты:
static: 5.02 4.65 5.17
dynamic: 5.94 7.26 6.04
guided: 6.4 5.99 4.99
auto: 5.1 6.9 5.39
runtime: 6.06 4.67 4.68

Из них можно сделать вывод, что параметры static, 50 наилучшие для моей программы.

5) Вывод

Исходя из полученных данных, оба способа создания параллельной программы заметно уменьшают время ее выполнения. Но для программы, написанной мной, целесообразнее использовать первый вариант распараллеливания. Если программа написана примерно как в Приложении 3, то второй способ имеет немалый смысл.

3. Приложения

Все программы также находятся на GitHub:
https://github.com/whoitandrei/OPP/tree/master/lab_1

Приложение 1. Листинг программы решения СЛАУ

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <cmath>
#include <ctime>

#define EPS 0.00001
#define TAU (1.9 / (size + 1))

/* math with vectors funcs */
std::vector<double> mulMatrixVector(const
std::vector<std::vector<double>>& matrix, const std::vector<double>&
vec, int size) {
    std::vector<double> result(size, 0.0);

    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            result[i] += matrix[i][j] * vec[j];
        }
    }
    return result;
}

std::vector<double> subVector(const std::vector<double>& vec1, const
std::vector<double>& vec2, int size) {
    std::vector<double> result(size);

    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        result[i] = vec1[i] - vec2[i];
    }
    return result;
}

void mulConstVector(std::vector<double>& vec, double num, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        vec[i] *= num;
    }
```

```
}

/* funcs with matrices (init etc.) */
void initMatrix(std::vector<std::vector<double>>* matrix, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            if (i == j) (*matrix)[i][j] = 2;
            else (*matrix)[i][j] = 1;
        }
    }
}

void initVectorB(std::vector<double>* B, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        (*B)[i] = size + 1;
    }
}

void initVectorX(std::vector<double>* X, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        (*X)[i] = 0.;
    }
}

/* funcs for solve approximating to EPS */
double normOfVector(const std::vector<double>& vec, int size) {
    double result = 0;
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        result += (vec[i] * vec[i]);
    }
    return sqrt(result);
}

bool isGoodSolve(const std::vector<double>& AX_B, const
std::vector<double>& B, int size) {
    return (normOfVector(AX_B, size) / normOfVector(B, size)) < EPS ?
true : false;
}

// (main loop of program)
void findGoodSolve(const std::vector<std::vector<double>>& A,
std::vector<double>* X, const std::vector<double>& B, int size) {
```

```
    std::vector<double> AX_B = subVector(mulMatrixVector(A, *X, size),
B, size);

    while (!isGoodSolve(AX_B, B, size)) {
        mulConstVector(AX_B, TAU, size);
        *X = subVector(*X, AX_B, size);
        AX_B = subVector(mulMatrixVector(A, *X, size), B, size);
    }
}

/* main func */

/* main func */
int main() {
    int size;
    std::cout << "input N (size of matrix): " << std::endl;
    std::cin >> size;

    std::vector<std::vector<double>> A(size,
std::vector<double>(size));
    std::vector<double> X(size);
    std::vector<double> B(size);

    initMatrix(&A, size);
    initVectorB(&B, size);
    initVectorX(&X, size);

    findGoodSolve(A, &X, B, size);

    std::cout << "answer (vector X):" << std::endl;
    std::cout << X[0] << " " << X[size/3] << " " << X[size/2] << " " <<
X[size-1] << "\n";

    return 0;
}
```

Приложение 2. Листинг распараллеленной программы (вариант 1)

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <cmath>
#include <ctime>
#include <omp.h>

#define EPS 0.00001
#define TAU (1.9 / (size + 1))

/* math with vectors funcs */
std::vector<double> mulMatrixVector(const
std::vector<std::vector<double>>& matrix, const std::vector<double>&
vec, int size) {
    std::vector<double> result(size, 0.0);

    #pragma omp parallel for
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            result[i] += matrix[i][j] * vec[j];
        }
    }
    return result;
}

std::vector<double> subVector(const std::vector<double>& vec1, const
std::vector<double>& vec2, int size) {
    std::vector<double> result(size);

    #pragma omp parallel for
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        result[i] = vec1[i] - vec2[i];
    }
    return result;
}

void mulConstVector(std::vector<double>& vec, double num, int size) {
    #pragma omp parallel for
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        vec[i] *= num;
    }
```

```
}

/* funcs with matrices (init etc.) */
void initMatrix(std::vector<std::vector<double>>* matrix, int size) {
    #pragma omp parallel for
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            if (i == j) (*matrix)[i][j] = 2;
            else (*matrix)[i][j] = 1;
        }
    }
}

void initVectorB(std::vector<double>* B, int size) {
    #pragma omp parallel for
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        (*B)[i] = size + 1;
    }
}

void initVectorX(std::vector<double>* X, int size) {
    #pragma omp parallel for
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        (*X)[i] = 0.;
    }
}

/* funcs for solve approximating to EPS */
double normOfVector(const std::vector<double>& vec, int size) {
    double result = 0;
    #pragma omp parallel for reduction(+:result)
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        result += (vec[i] * vec[i]);
    }
    return sqrt(result);
}

bool isGoodSolve(const std::vector<double>& AX_B, const
std::vector<double>& B, int size) {
    return (normOfVector(AX_B, size) / normOfVector(B, size)) < EPS;
}

// (main loop of program)
```

```
void findGoodSolve(const std::vector<std::vector<double>>& A,
std::vector<double>* X, const std::vector<double>& B, int size) {
    std::vector<double> AX_B = subVector(mulMatrixVector(A, *X, size),
B, size);

    while (!isGoodSolve(AX_B, B, size)) {
        mulConstVector(AX_B, TAU, size);
        *X = subVector(*X, AX_B, size);
        AX_B = subVector(mulMatrixVector(A, *X, size), B, size);
    }
}

/* main func */
int main() {
    int size;
    std::cout << "input N (size of matrix): ";
    std::cin >> size;

    int T;
    std::cout << "input T (num of threads): ";
    std::cin >> T;

    omp_set_num_threads(T);

    std::vector<std::vector<double>> A(size,
std::vector<double>(size));
    std::vector<double> X(size);
    std::vector<double> B(size);

    initMatrix(&A, size);
    initVectorB(&B, size);
    initVectorX(&X, size);

    double start = omp_get_wtime();
    findGoodSolve(A, &X, B, size);
    double end = omp_get_wtime();

    std::cout << "\nTime: " << end - start << " seconds" << std::endl
<< std::endl;
    std::cout << "Answer (some nums from vector X):" << std::endl;
    std::cout << X[0] << " " << X[size/3] << " " << X[size/2] << " " <<
X[size-1] << std::endl;
```

```
    return 0;
}
```

Приложение 3. Листинг распараллеленной программы (вариант 2)

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <cmath>
#include <ctime>
#include <omp.h>

#define EPS 0.00001
#define TAU (1.9 / (size + 1))

/* math with vectors funcs */
std::vector<double> mulMatrixVector(const
std::vector<std::vector<double>>& matrix, const std::vector<double>&
vec, int size) {
    std::vector<double> result(size, 0.0);

    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            result[i] += matrix[i][j] * vec[j];
        }
    }
    return result;
}

std::vector<double> subVector(const std::vector<double>& vec1, const
std::vector<double>& vec2, int size) {
    std::vector<double> result(size);

    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        result[i] = vec1[i] - vec2[i];
    }
    return result;
}

void mulConstVector(std::vector<double>& vec, double num, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        vec[i] *= num;
    }
}
```

```cpp
/* funcs with matrices (init etc.) */
void initMatrix(std::vector<std::vector<double>>* matrix, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            if (i == j) (*matrix)[i][j] = 2;
            else (*matrix)[i][j] = 1;
        }
    }
}

void initVectorB(std::vector<double>* B, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        (*B)[i] = size + 1;
    }
}

void initVectorX(std::vector<double>* X, int size) {
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        (*X)[i] = 0.;
    }
}

/* funcs for solve approximating to EPS */
double normOfVector(const std::vector<double>& vec, int size) {
    double result = 0;
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        result += (vec[i] * vec[i]);
    }
    return sqrt(result);
}

bool isGoodSolve(const std::vector<double>& AX_B, const
std::vector<double>& B, int size) {
    return (normOfVector(AX_B, size) / normOfVector(B, size)) < EPS ?
true : false;
}

// (main loop of program)
void findGoodSolve(const std::vector<std::vector<double>>& A,
std::vector<double>& X, const std::vector<double>& B, int size) {
    std::vector<double> AX_B(size);
    double norm_AB , norm_B;
```

```
#pragma omp parallel
{
    while (true) {
        #pragma omp for
        for (int i = 0; i < size; ++i) {
            double sum = 0.0;
            for (int j = 0; j < size; ++j) {
                sum += A[i][j] * X[j];
            }
            AX_B[i] = sum - B[i];
        }

        #pragma omp single
        {
            norm_AB = 0.0;
            norm_B = 0.0;
        }


        #pragma omp for reduction(+:norm_AB)
        for (int i = 0; i < size; ++i) {
            norm_AB += AX_B[i] * AX_B[i];
        }

        #pragma omp for reduction(+:norm_B)
        for (int i = 0; i < size; ++i) {
            norm_B += B[i] * B[i];
        }

        #pragma omp single
        {
            norm_AB = sqrt(norm_AB);
            norm_B = sqrt(norm_B);
        }

        if (norm_AB / norm_B < EPS) break;

        #pragma omp for
        for (int i = 0; i < size; ++i) {
            X[i] -= TAU * AX_B[i];
        }
    }
}
```

```
}




/* main func */
int main() {
    int size;
    std::cout << "input N (size of matrix): " << std::endl;
    std::cin >> size;

    int T;
    std::cout << "input T (num of threads): ";
    std::cin >> T;

    omp_set_num_threads(T);

    std::vector<std::vector<double>> A(size,
std::vector<double>(size));
    std::vector<double> X(size);
    std::vector<double> B(size);

    initMatrix(&A, size);
    initVectorB(&B, size);
    initVectorX(&X, size);

    double start = omp_get_wtime();
    findGoodSolve(A, X, B, size);
    double end = omp_get_wtime();

    std::cout << "\nTime: " << end - start << " seconds" << std::endl
<< std::endl;
    std::cout << "Answer ( some nums from vector X):" << std::endl;
    std::cout << X[0] << " " << X[size/3] << " " << X[size/2] << " " <<
X[size-1] << std::endl;

    return 0;
}
```

Приложение 4. Листинг компилирующего bash-скрипта

```
#!/bin/bash

SRC_DIR="src"
BIN_DIR="bin"
mkdir -p $BIN_DIR

g++ -Wall -Wextra -o $BIN_DIR/SLAU $SRC_DIR/SLAU.cpp
g++ -Wall -Wextra -fopenmp -o $BIN_DIR/omp1 $SRC_DIR/omp1.cpp
g++ -Wall -Wextra -fopenmp -o $BIN_DIR/omp2 $SRC_DIR/omp2.cpp

if [ $? -eq 0 ]; then
        echo "file compiled in [$BIN_DIR] directory"
else
        echo "error"
```

Приложение 5. Программа для построения графиков

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

with open("output.txt", "r") as file:
        data = file.readline().strip()

measurements = list(map(float, data.split()))

x_positions = np.arange(len(measurements))
x_labels = [1, 2, 4, 8, 16, 24]

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(x_positions, measurements, marker='o', linestyle='-', color='blue')

plt.title("График измерений")
plt.xlabel("Количество фрагментов")
plt.ylabel("Измеренные значения")

plt.xticks(x_positions, x_labels, rotation=45)

plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Приложение 6. Программа для поиска наилучших параметров schedule
Компиляция проводилась командой вида: *g++ -Wall -Wextra -fopenmp src/test_sc.cpp -o bin/test_sc -DSCHELDUE_TYPE=runtime -DCHUNK_SIZE=100*

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <cmath>
#include <ctime>
#include <omp.h>
#include <numeric>

#define EPS 0.00001
#define TAU (1.9 / (size + 1))

#ifndef SCHEDULE_TYPE
    #define SCHEDULE_TYPE static
#endif

#ifndef CHUNK_SIZE
    #define CHUNK_SIZE 10
#endif

std::vector<double> mulMatrixVector(const
std::vector<std::vector<double>>& matrix, const std::vector<double>&
vec, int size) {
    std::vector<double> result(size, 0.0);

    #pragma omp parallel for schedule(SCHEDULE_TYPE, CHUNK_SIZE)
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            result[i] += matrix[i][j] * vec[j];
        }
    }
    return result;
}

std::vector<double> subVector(const std::vector<double>& vec1, const
std::vector<double>& vec2, int size) {
    std::vector<double> result(size);

    #pragma omp parallel for schedule(SCHEDULE_TYPE, CHUNK_SIZE)
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
```

```
        result[i] = vec1[i] - vec2[i];
    }
    return result;
}

void mulConstVector(std::vector<double>& vec, double num, int size) {
    #pragma omp parallel for schedule(SCHEDULE_TYPE, CHUNK_SIZE)
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        vec[i] *= num;
    }
}

void initMatrix(std::vector<std::vector<double>>& matrix, int size) {
    #pragma omp parallel for schedule(SCHEDULE_TYPE, CHUNK_SIZE)
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        for (int j = 0; j < size; ++j) {
            matrix[i][j] = (i == j) ? 2 : 1;
        }
    }
}

void initVector(std::vector<double>& vec, int size, double value) {
    #pragma omp parallel for schedule(SCHEDULE_TYPE, CHUNK_SIZE)
    for (int i = 0; i < size; ++i) {
        vec[i] = value;
    }
}

void findGoodSolve(const std::vector<std::vector<double>>& A,
std::vector<double>& X, const std::vector<double>& B, int size) {
    std::vector<double> AX_B = subVector(mulMatrixVector(A, X, size),
B, size);

    while (sqrt(std::inner_product(AX_B.begin(), AX_B.end(),
AX_B.begin(), 0.0)) / sqrt(std::inner_product(B.begin(), B.end(),
B.begin(), 0.0)) >= EPS) {
        mulConstVector(AX_B, TAU, size);
        X = subVector(X, AX_B, size);
        AX_B = subVector(mulMatrixVector(A, X, size), B, size);
    }
}

int main() {
```

```
    int size = 1000;
    int T = 4;

    omp_set_num_threads(T);

    std::vector<std::vector<double>> A(size,
std::vector<double>(size));
    std::vector<double> X(size);
    std::vector<double> B(size);

    initMatrix(A, size);
    initVector(B, size, size + 1);
    initVector(X, size, 0.0);

    double start = omp_get_wtime();
    findGoodSolve(A, X, B, size);
    double end = omp_get_wtime();

    std::cout << "\nTime: " << end - start << " seconds" << std::endl;
    std::cout << "Answer (some nums from vector X):" << std::endl;
    std::cout << X[0] << " " << X[size/3] << " " << X[size/2] << " " <<
X[size-1] << std::endl;

    return 0;
}
```