Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Systemy równoległe i rozproszone

Drzewa wszystkich najkrótszych ścieżek - algorytm Dijkstry
Aplikacja równoległa MPI

Arkadiusz Kasprzak
Aleksandra Poręba

27 kwietnia 2020

Spis treści

1 Wstęp

Niniejszy dokument stanowi dokumentację projektu wykonanego w ramach przedmiotu *Systemy równoległe i rozproszone*. Tematem projektu było stworzenie, z użyciem protokołu MPI, aplikacji równoległej implementującej algorytm Dijkstry.

1.1 Algorytm Dijkstry

Zaimplementowany w ramach projektu algorytm Dijkstry jest algorytmem poszukiwania najkrótszych ścieżek z wybranego wierzchołka do wszystkich pozostałych w grafie (skierowanym lub nieskierowanym) o nieujemnych wagach krawędzi. Oparty jest on na metodzie zachłannej: w każdym kroku wybierany jest wierzchołek, do którego koszt dojścia jest najmniejszy.

```
V − zbior wierzcholkow
E − zbior krawedzi z wagami
v − wierzcholek startowy

Dijkstra(V, E, v)
    Q := ∅;
    p := −1;
    d := ∞
    d(v) := 0
    dopoki Q != V wykonaj
        wybierz spoza zbioru Q wierzcholek u o najmniejszym koszcie d(u)
        Q := Q ∪ {u}
        dla kazdego sasiada w wierzcholka u spoza zbioru Q wykonaj
            jesli d(w) > d(u) + E(w, u) to
                d (w) :=  d(u) + E(w, u)
                p(w) := u
```

Listing 1: Pseudokod algorytmu Dijkstry.

W czasie wykonania algorytmu program operuje na dwóch tablicach - jedna z nich, zwykle oznaczana literą `d`, przechowuje koszty dotarcia z wierzchołka źródłowego do każdego z wierzchołków w badanym grafie. Druga, oznaczana literą `p`, przechowuje informację o poprzedniku każdego z wierzchołków - taka informacja pozwala po zakończeniu działania algorytmu odtworzyć ścieżkę z wierzchołka źródłowego do każdego z wierzchołków w grafie.

1.2 Zastosowane technologie

Przygotowana aplikacja napisana została we języku C++ (w standardzie C++11). Do jej implementacji zastosowany został standard MPI (*Message*

Passing Interface), który stanowi protokół komunikacyjny pomiędzy równoległymi procesami. Wymiana informacji odbywa się za pomocą jawnie przekazywanych komunikatów. Możliwe są różne rodzaje komunikacji, na przykład typu punkt-punkt pomiędzy dwoma procesami (`MPI_Send`, `MPI_Recv`), albo komunikacja grupowa, gdzie bierze udział wiele procesów (na przykład `MPI_Bcast`, `MPI_Reduce`). Standard MPI jest wysocy wydajny i umożliwia efektywną obsługą dużej ilości procesów. W projekcie została użyta biblioteka `MPICH` będąca implementacją standardu MPI. Pomocnicze skrypty napisane zostały w języku Python. System budowania oparty został na narzędziu CMake, jednak z uwagi na fakt, iż narzędzie to nie jest dostępne na komputerach pracowni wydziału, przygotowany został dodatkowy zestaw plików Makefile.

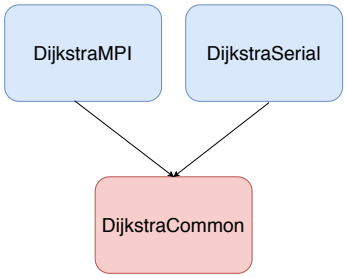
2 Budowa projektu

W tej części dokumentacji opisana została budowa przygotowanego projektu - zarówno jeśli chodzi o podział projektu na komponenty (biblioteki), jak i na poszczególne klasy. Nie jest to natomiast dokumentacja kodu - ta została przygotowana odrębnie, w postaci zbioru dokumentów HTML, przy pomocy narzędzia `Doxygen`.

2.1 Podział na komponenty

Projekt podzielony został na trzy główne komponenty:

- `DijkstraCommon` - biblioteka statyczna zawierająca klasy oraz funkcje współdzielone przez pozostałe dwa komponenty. W jej skład wchodzą klasy odpowiedzialne za: zapis wyników obliczeń, walidację danych podanych przez użytkownika, przechowywanie danych na temat przetwarzanego grafu i jego poszczególnych wierzchołków czy przetwarzanie argumentów linii poleceń. Zawiera również klasę `DijkstraAlgorithmBackend` stanowiącą szkielet implementowanego algorytmu,
- `DijkstraSerial` - implementacja algorytmu bez użycia protokołu MPI, czyli w formie klasycznego algorytmu szeregowego. Komponent ten został dołączony do projektu jako punkt odniesienia w procesie testowania wydajności implementacji równoległej. Zawiera funkcję `main`,
- `DijkstraMPI` - implementacja algorytmu używająca protokołu MPI. Jest to jedyny komponent projektu używający tej biblioteki. Zawiera funkcję `main`.



Rysunek 1: Komponenty wchodzące w skład projektu wraz z wzajemnymi zależnościami.

Zależności między poszczególnymi komponentami przedstawia rysunek 1. Na niebiesko oznaczone zostały komponenty produkujące plik wykonywalny, na czerwono natomiast biblioteki. Każdy z komponentów znajduje się w osobnym katalogu o nazwie odpowiadającej nazwie komponentu.

2.2 Najważniejsze klasy w projekcie

Poniżej przedstawiono listę najważniejszych klas wchodzących w skład projektu (nie jest to pełna lista wszystkich klas, taką listę znaleźć można w dokumentacji wygenerowanej za pomocą narzędzia `Doxygen`):

- klasa `DijkstraAlgorithmBackend` z komponentu `DijkstraCommon` - stanowi podstawę implementacji algorytmu zarówno w przypadku równoległym, jak i sekwencyjnym. Zarządza stanem wykonania algorytmu i wykonuje na tym stanie podstawowe operacje przewidziane przez algorytm, np. dodanie wierzchołka do zbioru wierzchołków przetworzonych czy wybór wierzchołka o najniższym koszcie,

- klasa `DijkstraMPI` z komponentu `DijkstraMPI` - zawiera równoległą implementację algorytmu Dijkstry. Korzysta z API udostępnionego przez klasę `DijkstraAlgorithmBackend`. Dostarcza pojedynczą metodę `run` wykonującą algorytm i zwracającą jego wynik,

- klasa `DijkstraSerial` z komponentu `DijkstraSerial` - zawiera sekwencyjną implementację algorytmu Dijkstry. Korzysta z API udostępnionego przez klasę `DijkstraAlgorithmBackend`. Dostarcza pojedynczą metodę `run` wykonującą algorytm i zwracającą jego wynik,

- klasa `AdjacencyMatrix` z komponentu `DijkstraCommon` - pozwala na wczytanie i przechowywanie danych wejściowych,

- klasa szablonowa `Log` - udostępnia opcję wypisywania na standardowe wyjście informacji na temat działania algorytmu. Posiada specjalizację `Log<false>`, które wyłącza mechanizm wypisywania informacji. Implementacja wypisywania oparta jest na tzw. *variadic templates* z C++11.

3 Działanie projektu

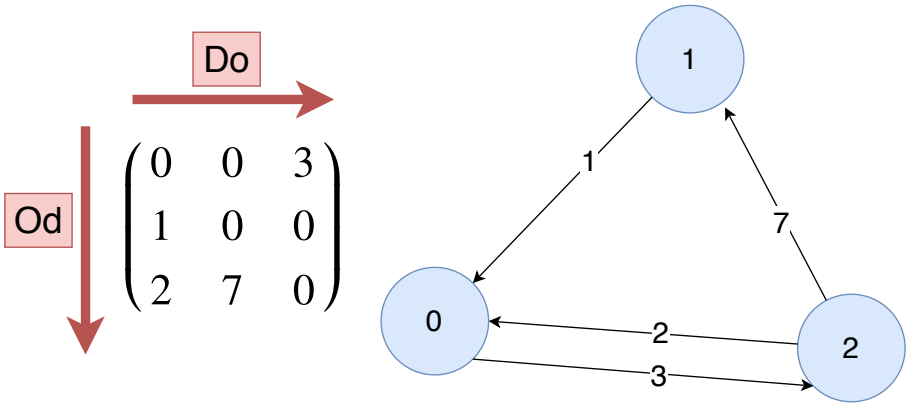
W tej części dokumentacji omówiony zostanie sposób działania implementacji algorytmu Dijkstry wykorzystującej protokół MPI. Algorytm składa się z trzech głównych części:

- inicjalizacja - podział danych wejściowych na części, walidacja, rozesłanie danych do poszczególnych procesów
- obliczenie odległości i ścieżek (algorytm Dijkstry)
- zapisanie wyników do pliku i zakończenie działania programu

3.1 Inicjalizacja

Pierwsza część programu składa się z kilku mniejszych etapów. Na początku ma miejsce standardowa inicjalizacja protokołu MPI oraz przypisanie każdemu z procesów rangi. Kolejnym etapem jest utworzenie klasy odpowiedzialnej za wyświetlanie informacji o przebiegu programu na standardowe wyjście. W dalszej kolejności przetwarzane i walidowane są dane wejściowe - numer wierzchołka stanowiącego źródło oraz ścieżka do pliku z danymi wejściowymi. W przypadku, gdy dane są niepoprawne, program kończy działanie wyświetlając odpowiedni komunikat.

Następnie odbywa się podział danych wejściowych na części i rozesłanie ich do poszczególnych procesów. Program przyjmuje informacje na temat przetwarzanego grafu w postaci tzw. **macierzy sąsiedztwa**. W i-tym rzędzie i j-tej kolumnie takiej macierzy znajduje się waga przypisana do krawędzi łączącej wierzchołek i z wierzchołkiem j. W przypadku braku krawędzi waga wynosi 0. Rysunek 2 przedstawia przykład tego typu reprezentacji wraz z odpowiadającym jej grafem.



Rysunek 2: Przykładowa macierz sąsiedztwa wraz z odpowiadającym jej grafem skierowanym.

Macierz sąsiedztwa wczytywana jest z pliku z danymi wejściowymi przez proces główny (proces `root` o identyfikatorze 0). Proces ten dokonuje podziału macierzy na części zgodnie z ilością procesów biorących udział w wykonaniu algorytmu. Każdy z procesów otrzymuje k kolumn oryginalnej macierzy w formie ciągłego obszaru pamięci - przykładowy podział dla grafu o 5 wierzchołkach i 3 procesów przedstawia rysunek 3.

Algorytm podziału jest prosty. Dana jest macierz o n kolumnach i m procesów. Najpierw każdemu z procesów przypisywane jest:

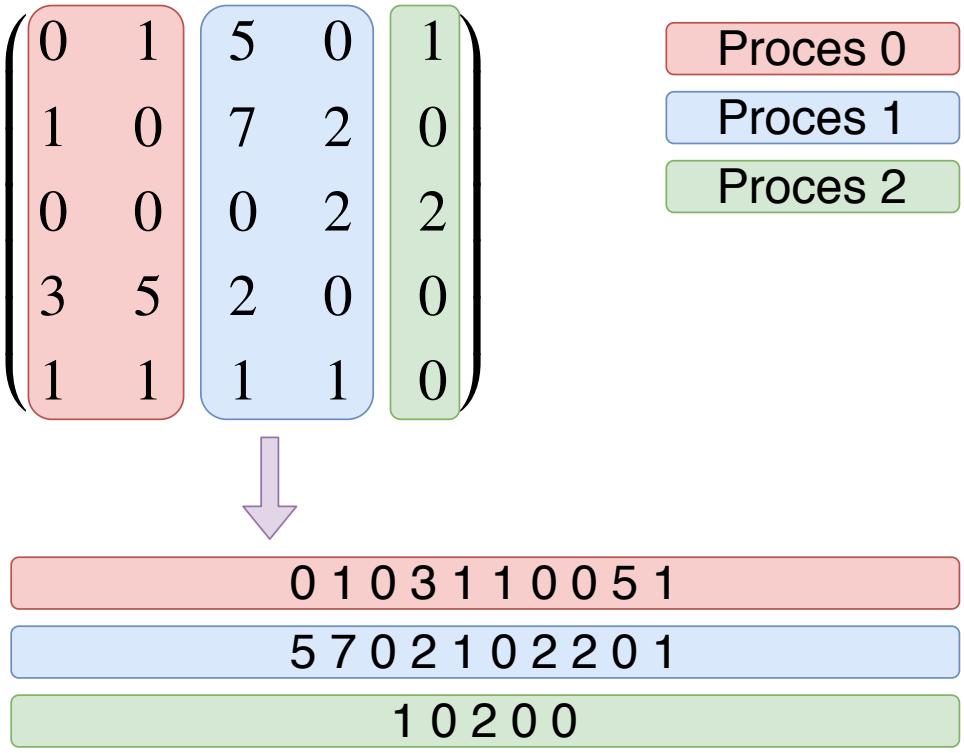
$$a = \left\lfloor \frac{n}{m} \right\rfloor \tag{1}$$

kolumn - w przypadku $n = 5$ i $m = 3$ każdy proces otrzymuje domyślnie jedną kolumnę. Ilość pozostałych kolumn dana jest zależnością:

$$k = n \mod m \tag{2}$$

W analizowanym przykładzie jest to $k = 2$. Kolumny te rozdzielane są po jednej pomiędzy k pierwszych (zgodnie z numeracją nadaną przez MPI)

procesów. Ostatecznie w omawianym przykładzie proces zerowy i pierwszy otrzymują po dwie kolumny, proces drugi otrzymuje natomiast tylko jedną kolumnę.



Rysunek 3: Przykładowy podział macierzy sąsiedztwa reprezentującej graf o 5 wierzchołkach. W wykonaniu algorytmu biorą udział 3 procesy.

Kolumny przypisywane są każdemu procesowi po kolei, tzn. proces 0 otrzymuje x_0 pierwszych kolumn macierzy, proces 1 kolejne x_1 itd. Zbiór kolumn reprezentowany jest za pomocą jednowymiarowej tablicy - ułożone są w niej kolejno dane z pierwszej, drugiej itd. kolumny.

Po dokonaniu przez proces `root` podziału, do każdego z procesów wysyłane są trzy informacje:

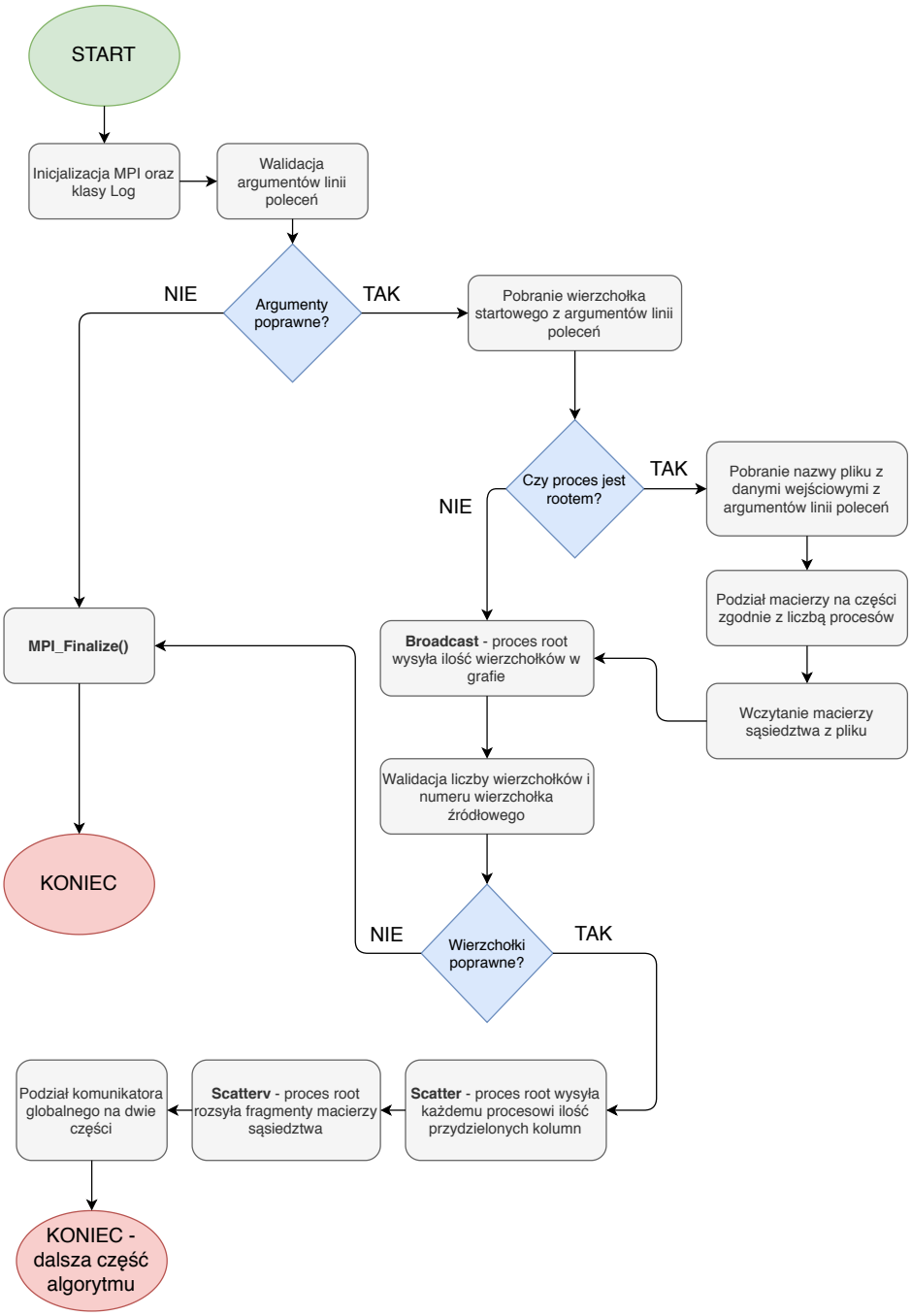
- całkowita liczba wierzchołków w przetwarzanym grafie - wysyłanie odbywa się za pomocą operacji kolektywnej, `MPI_Bcast`
- ilość kolumn macierzy sąsiedztwa, jaką każdy z procesów będzie musiał obsłużyć. Informacja ta jest w tym momencie potrzebna, ponieważ każdy z procesów musi przygotować sobie odpowiednio duży bufor na dane z samej macierzy. Wysyłanie tej informacji odbywa się za pomocą operacji `MPI_Scatter`, ponieważ każdy z procesów otrzymuje swoją indywidualną informację,
- zawartość kolumn macierzy sąsiedztwa, które będą przetwarzane przez dany proces. Wysyłanie tej informacji odbywa się za pomocą funkcji `MPI_Scatterv`, ponieważ jest ona w stanie obsłużyć wysyłanie innej ilości danych do każdego z procesów.

Po zakończeniu wysyłania danych następuje podział procesów na dwie grupy: procesy które otrzymały przynajmniej jedną kolumnę oraz takie, które nie otrzymały żadnej (ma to miejsce, gdy do wykonania algorytmu przydzielone zostaje więcej procesów, niż przetwarzany graf posiada wierzchołków). W tym celu za pomocą operacji `MPI_Comm_split` komunikator globalny dzielony jest na dwa komunikatory. Kryterium podziału stanowi tutaj właśnie sprawdzenie, czy procesowi zostały przydzielone kolumny macierzy do obsługi (`numberOfColumnsToHandle` > 0). Pozwala to wykluczyć nadmiarowe procesy z dalszego przebiegu algorytmu.

Przebieg procesu inicjalizacji jest komunikowany użytkownikowi - na standardowym wyjściu pojawiają się odpowiednie informacje. Poniżej zamieszczono przykład takich informacji wygenerowany dla przykładu widocznego na rysunku 3:

```
[Process 0] This process will handle 2 vertices in range [0, 1]
[Process 1] This process will handle 2 vertices in range [2, 3]
[Process 2] This process will handle 1 vertices in range [4, 4]
...
```

Rysunek 4 przedstawia **schemat blokowy** ilustrujący przebieg procesu inicjalizacji.



Rysunek 4: Schemat blokowy ilustrujący przebieg procesu inicjalizacji.

3.2 Implementacja i zakończenie algorytmu

Początek właściwej części programu stanowi sprawdzenie, czy danemu procesowi przydzielone zostały wierzchołki grafu (czyli kolumny macierzy sąsiedztwa) do przetworzenia. Jeśli nie, to taki proces nie bierze udziału w dalszym wykonaniu algorytmu - następuje dealokacja utworzonego komunikatora i zakończenie działania. W przeciwnym wypadku proces przystępuje do realizacji algorytmu.

Implementacja algorytmu Dijkstry za pomocą protokołu MPI nie różni się w sposób znaczący od klasycznej implementacji szeregowej. Każdy z procesów obsługuje dwie tablice:

- tablica odległości (kosztów) od wierzchołka źródłowego do każdego z wierzchołków w grafie,
- tablica poprzedników każdego z wierzchołków - służy do odtworzenia najkrótszych ścieżek między wierzchołkami,

oraz zbiór obsłużonych wierzchołków (często nazywany klastrem). Początkowo zbiór ten jest pusty, tablica kosztów zainicjalizowana jest nieskończonościami, a tablica poprzedników wartościami -1. Różnica w stosunku to szeregowej wersji algorytmu jest taka, że w przypadku implementacji równoległej każdy z procesów przechowuje **fragmenty tych tablic** odpowiadające przydzielonym im wierzchołkom grafu.

W procesie obsługującym wierzchołek źródłowy jego wpis w tablicy kosztów ustawiany jest na wartość 0. Następnie, dopóki wszystkie wierzchołki nie zostały przetworzone, wykonywany jest w pętli algorytm:

- każdy proces wybiera spośród przydzielonych mu wierzchołków taki, który nie został jeszcze dodany do zbioru wierzchołków obsłużonych i którego wartość w tablicy kosztów jest najmniejsza,
- za pomocą operacji `MPI_Allreduce` wybierany jest wierzchołek o globalnie najniższej wartości kosztu (czyli najlepszy spośród najlepszych z każdego procesu),
- jeśli nie został wyznaczony taki wierzchołek, to następuje wyjście z pętli i zakończenie algorytmu,

- w przeciwnym razie wierzchołek zostaje dodany do zbioru wierzchołków przetworzonych (w każdym procesie zbiór ten jest przechowywany osobno, w całości),
- dla każdego nieprzetworzonego sąsiada wyznaczonego wierzchołka dokonywana jest aktualizacja w tablicy kosztów i poprzedników (wybrany wierzchołek staje się poprzednikiem swoich sąsiadów), jeśli nowy koszt okazuje się niższy od dotychczasowego.

Po zakończeniu działania algorytmu fragmenty tablic kosztów i poprzedników są łączone w całość za pomocą operacji `MPI_Gatherv`. Proces `root` wyznacza ścieżki z wierzchołka źródłowego do każdego wierzchołka w grafie i zapisuje wyniki do pliku. Następnie wyświetlany jest czas działania algorytmu. Ostatnim krokiem jest zwolnienie utworzonego wcześniej komunikatora, wywołanie operacji `MPI_Finalize` i zakończenie działania programu.

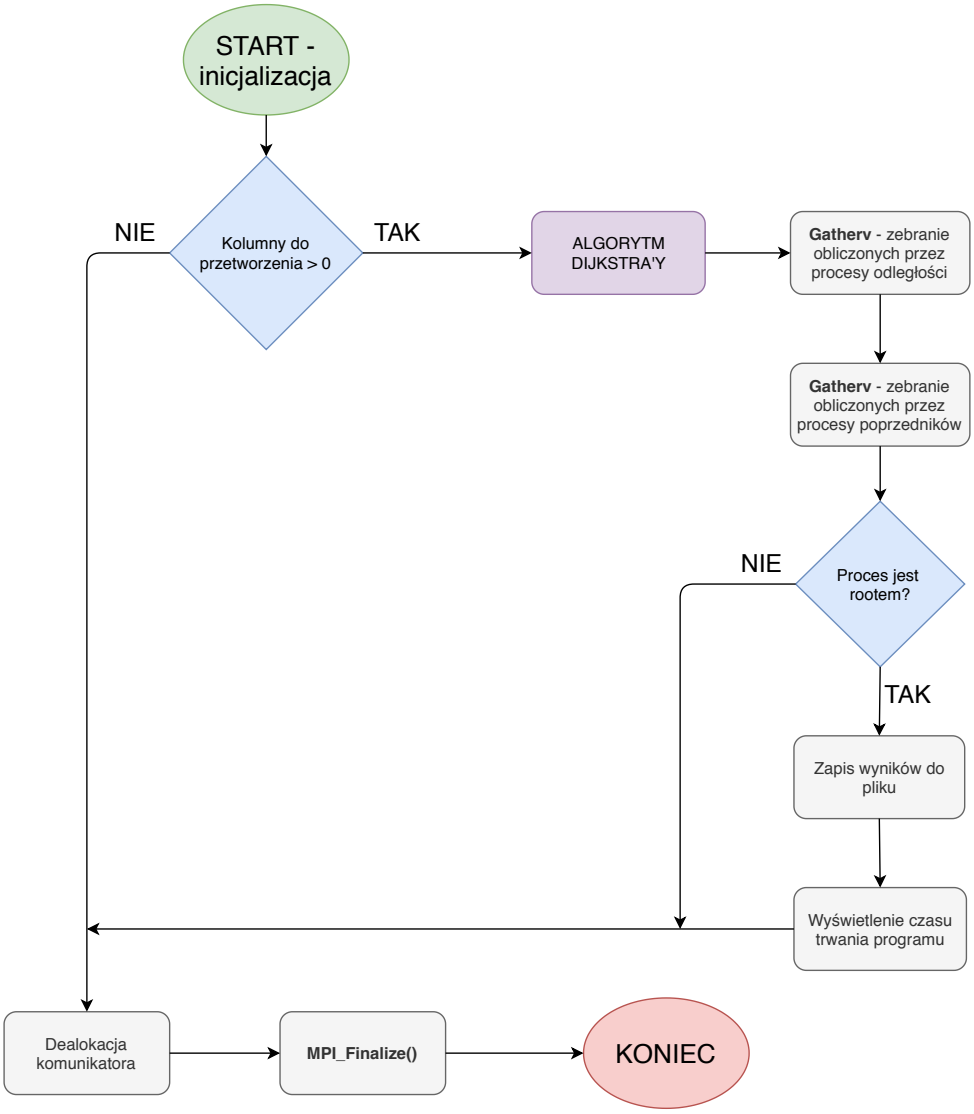
W kilku miejscach w programie tworzona jest zmienna zawierająca aktualny czas. Pod koniec działania proces `root` zbiera te informacje i wyświetla czas wykonywania się każdej z trzech części programu:

```
[Process 0] Total elapsed time: 0.0298846s
[Process 0] Setup took: 0.0260188s
[Process 0] Algorithm took: 0.0020106s
[Process 0] Printing solution took: 0.0018552s
```

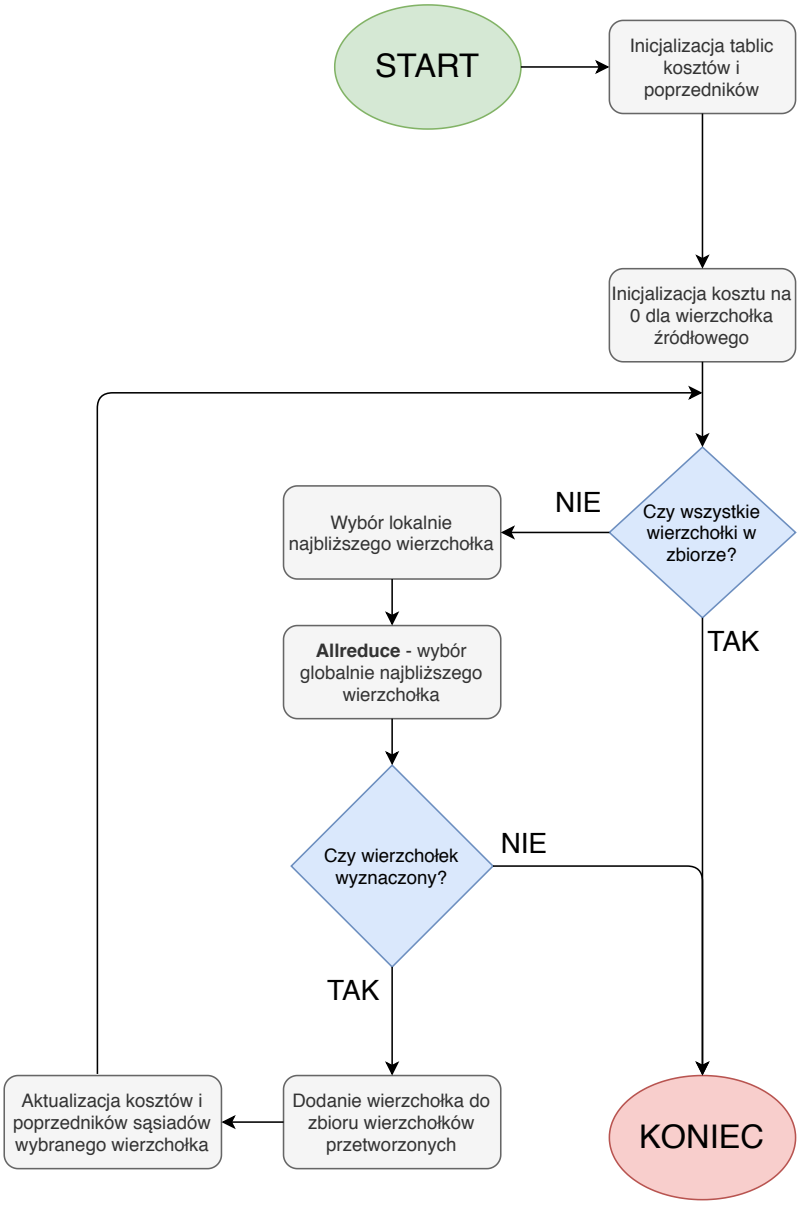
Wyświetlane są wyniki pomiarów dokonanych jedynie w procesie głównym - wyniki z pozostałych procesów są pomijane. Pomiar wykonywany jest z użyciem obiektu klasy `high_resolution_clock` z biblioteki `chrono` (standard C++11). Użycie takiego zegara gwarantuje, że mierzony czas jest czasem rzeczywistym, a nie czasem procesora.

Rysunek 5 przedstawia schemat blokowy ilustrujący przebieg działania algorytmu po inicjalizacji. Kolorem fioletowym oznaczony został blok związany z główną pętlą algorytmu Dijkstry. Schemat ten nie zawiera szczegółów jej działania.

Rysunek 6 przedstawia schemat blokowy ilustrujący działania głównej pętli algorytmu Dijkstry. Schemat ten stanowi rozwinięcie fioletowego bloku z rysunku 5.



Rysunek 5: Schemat blokowy ilustrujący przebieg głównej części programu wraz z zapisaniem wyników i zakończeniem. Schemat nie zawiera implementacji algorytmu Dijkstry.



Rysunek 6: Schemat blokowy ilustrujący przebieg głównej pętli algorytmu Dijkstry.

3.3 Zastosowane funkcjonalności MPI

W ramach projektu zastosowane zostały następujące funkcjonalności MPI:

- operacja `MPI_Bcast` - w celu rozesłania wszystkim procesom informacji o całkowitej ilości wierzchołków w przetwarzanym grafie,
- operacja `MPI_Scatter` - w celu wysłania każdemu z procesów liczby przypisanych mu do obsłużenia wierzchołków grafu,
- operacja `MPI_Scatterv` - celu wysłania każdemu z procesów danych z macierzy sąsiedztwa. Wymagana jest w tym przypadku możliwość wysłania każdemu z procesów danych o różnej długości,
- operacja `MPI_Allreduce` - w celu wyznaczenia wierzchołka o najmniejszej wartości kosztu,
- operacja `MPI_Gatherv` - w celu zebrania wyników wyprodukowanych przez każdy z procesów. W tym przypadku wymagana jest możliwość odbioru od każdego z procesów danych i innej długości,
- operacje `MPI_Comm_split` oraz `MPI_Comm_free` - w celu utworzenia i zwolnienia nowego komunikatora. Pozwala to wykluczyć bierne (nadmiarowe) procesy z udziału w wykonywaniu algorytmu.

4 Testy projektu

Działanie przygotowanego programu zostało przetestowane ze względu na poprawność działania i wydajność. Niniejsza część dokumentacji zawiera opis przeprowadzonych testów wydajnościowych. Przeprowadzone zostały one zdalnie na komputerach pracowni Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Badane były dwie wielkości:

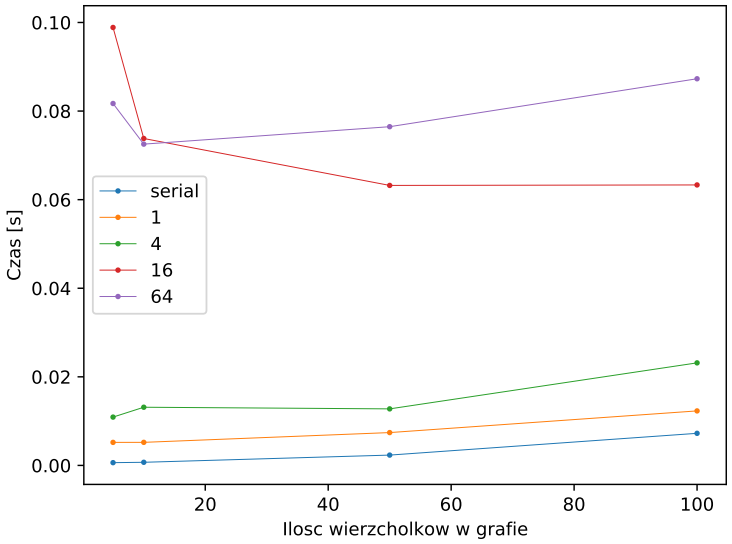
- czas wykonania się całego programu (z perspektywy procesu o identyfikatorze 0)
- czas wykonania się części algorytmicznej programu (z pominięciem wstępnej konfiguracji, rozsyłania danych oraz zapisu wyników do pliku)

Do testów użyte zostały grafy składające się kolejno z: 5, 10, 50, 100, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 i 5000 wierzchołków. W każdym z przypadków ilość krawędzi grafu dana była zależnością:

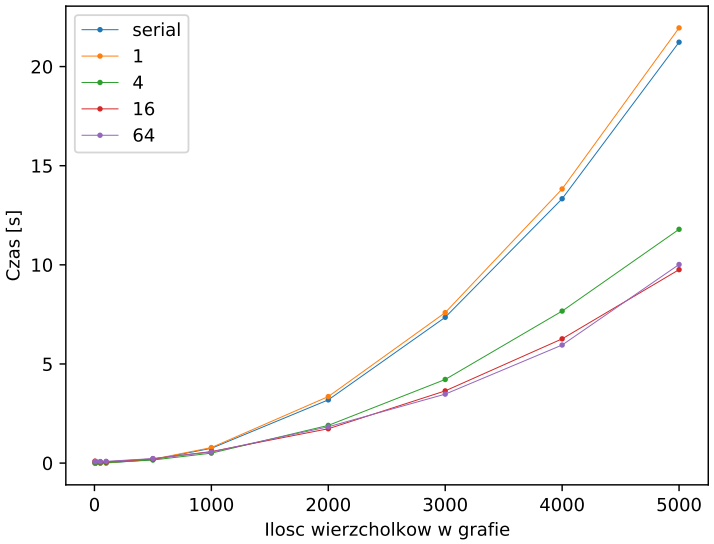
$$k = \frac{n(n-1)}{2} \tag{3}$$

czyli było to około połowy wszystkich możliwych krawędzi. Do testów użyte zostały wszystkie dostępne węzły. Program uruchamiany był zarówno w wersji sekwencyjnej (`DijkstraSerial`), jak i zrównoleglonej (`DijkstraMPI`). W tym drugim przypadku zastosowane zostały następujące liczby procesów: 1, 4, 16, 64. Dla każdej kombinacji danych wejściowych i liczby procesów przeprowadzone zostały 3 próby, z których wyciągana była następnie średnia.

Rysunek 7 przedstawia wyniki uzyskane w badaniach czasu wykonania się całego programu. Legendy obu wykresów zawierają opis wykorzystanej konfiguracji (`serial` lub liczba procesów w konfiguracji `MPI`). Wykres 7a przedstawia wyniki pomiarów dla małej liczby wierzchołków - od 50 do 100. W tym wypadku wyraźnie widoczny jest spadek wydajności wynikający z użycia MPI - dla tak niewielkich danych wejściowych proces konfiguracji środowiska jest na tyle kosztowny, że jego użycie jest nieopłacalne.



(a) Pomiary dla małego rozmiaru danych wejściowych.



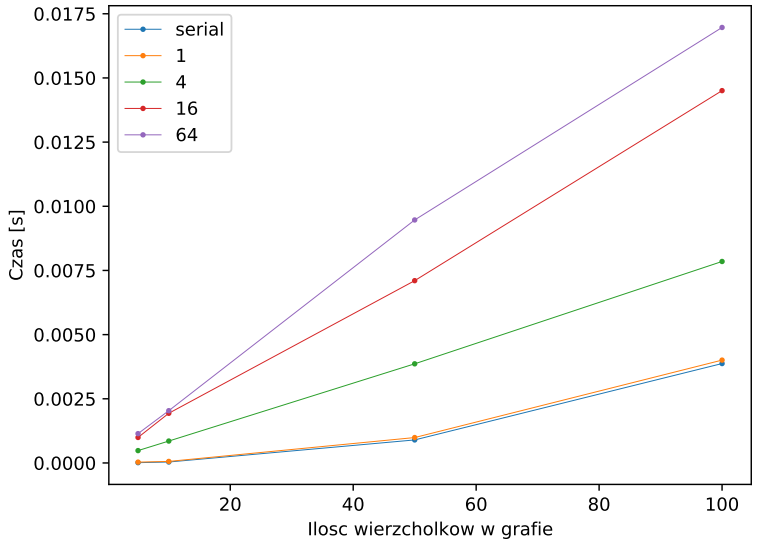
(b) Pomiary dla wszystkich możliwości liczby wierzchołków.

Rysunek 7: Wyniki testów działania programu - pomiar całościowego czasu działania.

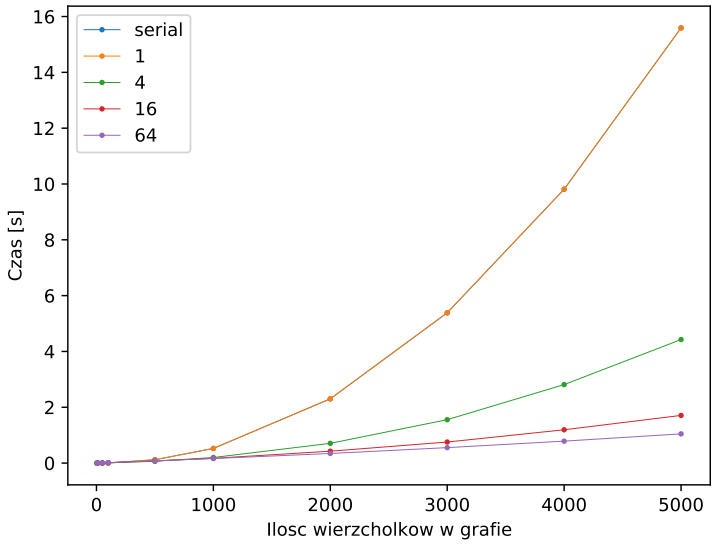
Inaczej jednak wygląda sytuacja przedstawiona na rysunku 7b. Można zaobserwować, że dla dużej liczby wierzchołków (ponad 1000) aplikacja działająca sekwencyjnie oraz wariant MPI wykorzystujący tylko jeden proces znacznie tracą na wydajności. Dla 5000 wierzchołków zysk z użycia 16 i 64 procesów jest ponad dwukrotny. Należy jednak zauważyć, że dla takiego rozmiaru danych nie było opłacalne użycie aż 64 procesów - czas wykonania był taki sam jak w przypadku zaledwie 16.

Rysunek 8 przedstawia pomiary analogiczne do poprzednich, ale wykonane tylko dla części programu realizującej algorytm Dijkstry. Podobnie jak poprzednio, dla małej wielkości danych wejściowych użycie dużej liczby procesów jest nieopłacalne. Tym razem jednak zależność nie jest stała - jest to funkcja rosnąca, zgodnie z oczekiwaniami. Dzieje się tak, ponieważ na pomiar całości programu duży wpływ miała inicjalizacja, w tym czytanie danych z pliku. Podobnie jak wcześniej, również w tym przypadku dla dużych danych wejściowych (od około 1000 wierzchołków) zysk z użycia większej liczby procesów staje się widoczny. Wyniki uzyskane w tym teście są znacznie bardziej zróżnicowane niż poprzednio - pokazuje to, jak duży wpływ ma działanie programu miało czytanie pliku z danymi w pierwszym etapie wykonania. W tym wypadku widoczny staje się również zysk z użycia większej niż 16 liczby procesów.

Podsumowując, wykorzystując więcej niż jeden proces można uzyskać znaczną poprawę wydajności, pod warunkiem ze dane mają odpowiednio duży rozmiar.



(a) Pomiary dla małego rozmiaru danych wejściowych.



(b) Pomiary dla wszystkich możliwości liczby wierzchołków.

Rysunek 8: Wyniki testów działania programu - pomiar działania części realizującej algorytm.

5 Obsługa programu

Niniejsza część dokumentacji przedstawia informacje związane z kompilacją i uruchomieniem projektu.

5.1 Obsługa programu na pracowni WFiIS

Z racji niedostępności narzędzia `CMake` na pracowni, zostały przygotowane dedykowane pliki `Makefile` do obsługi programu. Pliki przeznaczony do użycia przez użytkownika znajduje się w katalogu `build_uni`.

5.1.1 Skrypt Makefile

Udostępnione zostały następujące opcje dla skryptu `Makefile`:

- `make install` - udostępnienie plików wykonywalnych w podkatalogu,
- `make runMPI` - uruchomienie programu w wersji równoległej, opisane dokładnie w punkcie 5.3,
- `make runSerial` - uruchomienie programu w wersji sekwencyjnej, opisane dokładnie w punkcie 5.3,
- `make docs` - wygenerowanie dokumentacji `Doxygen`,
- `make clean` - przywrócenie zawartości podkatalogu do stanu wyjściowego.

5.1.2 Uruchomienie

Aby uruchomić program z przykładowymi argumentami należy wykonać następujące operacje (zakładając, że użytkownik znajduje się w katalogu głównym projektu):

```
$ cd build_uni
$ source /opt/nfs/config/source_mpich32.sh
$ make runMPI
```

Szczególnie istotnym punktem jest załadowanie odpowiednich zmiennych środowiskowych za pomocą dedykowanego skryptu `source_mpich32.sh`.

Uruchomienie programu bez użycia `make runMPI` wygląda następująco:

```
$ cd build_uni
$ source /opt/nfs/config/source_mpich32.sh
$ make installMPI
$ mpiexec -n 5 DijkstraMPI 1 "../data/graph.dat"
```

W podobny sposób jak powyższe możemy uruchomić wersję sekwencyjną.

5.1.3 Plik wejściowy z węzłami

Aby wygenerować plik wejściowy z węzłami, który może zostać użyty do uruchomienia wersji równoległej należy wykonać następujące polecenia:

```
$ cd build_uni
$ /opt/nfs/config/station_name_list.sh 201 216 > nodes
```

Tak wygenerowany plik można podać jako argument wykonania wersji równoległej programu:

```
$ make runMPI HOSTS="nodes"
```

5.2 Kompilacja

Przygotowany został plik `CMakeLists.txt`, za którego pomocą możliwe jest wygenerowanie pliku `Makefile` służącego do kompilacji. Preferowanym sposobem użycia tego pliku jest tzw. użycie *out-of-source* z katalogu `build`. Znajdując się w katalogu głównym projektu należy wykonać następujące operacje:

```
$ mkdir build
$ cd build
$ cmake ..
$ make
```

5.3 Uruchomienie

Aby uruchomić program użytkownik może skorzystać z opcji udostępnianych przez wygenerowany plik `Makefile`:

- `make runMPI` - uruchomiona zostaje równoległa wersja programu,

- `make runSerial` - uruchomiona zostaje sekwencyjna wersja programu.

Można skorzystać z domyślnych parametrów uruchomienia, lub podać własne:

- `VERTEX=V` - jako wierzchołek startowy zostanie wybrany wierzchołek `V`, domyślną wartością jest 0,
- `FILE=F` - jako plik wejściowy zostanie użyty plik `F`, plik domyślny to `../data/graph.dat`
- `N=N` - parametr `mpiexec` ustalający ilość procesów, wartość domyślna jest równa 1, dostępny tylko dla wersji równoległej,
- `HOSTS=H` - parametr `mpiexec`, plik wejściowy z węzłami, dostępny tylko dla wersji równoległej.

Przykładowe uruchomienie programu może wyglądać następująco:

```
$ make runMPI VERTEX=1 FILE="../data/graph.dat" N=5
```

Jeśli użytkownik nie chce skorzystać z udostępnionych opcji można również uruchomić pliki wykonywalne samodzielnie. Po wykonaniu komendy `make install-all` zostaną one udostępnione w katalogu z którego prowadzona była kompilacja. Jako argument należy podać kolejno numer wierzchołka startowego oraz plik wsadowy. Pierwszy argument jest obligatoryjny. Może to wyglądać na przykład tak jak poniżej:

```
$ make install-all
$ mpiexec -n 5 ./DijkstraMPI 1 "../data/graph.dat"
```

Po uruchomieniu programu, jeśli zostało włączone logowanie, zostaną wyświetlone informacje na temat czasu wykonania. Znalezione ścieżki są zapisywane do plików: odpowiednio `resultMPI.txt` oraz `resultSerial.txt`.

5.4 Dodatkowe opcje

Korzystając z udostępnionego `CMakeLists.txt` można również włączyć dodatkowe opcje, takie jak:

- `-DBUILD_DOC=ON|OFF` generowanie dokumentacji `Doxygen`, domyślnie ta opcja jest wyłączona,

- `-DSHOULD_LOG=TRUE|FALSE` włączenie/wyłączenie generowania logów.

Dostępne są również opcje programu `make`, takie jak:

- `make clean-all` - przywrócenie zawartości podkatalogu do stanu wyjściowego,
- `make install-all` - udostępnienie plików wykonywalnych w podkatalogu,
- `make doc` - wygenerowanie dokumentacji `Doxygen`,
- `make runMPI` - uruchomienie programu w wersji równoległej, opisane w punkcie 5.3,
- `make runSerial` - uruchomienie programu w wersji sekwencyjnej, opisane w punkcie 5.3,

5.5 Dane wejściowe

Program jako jedną z danych wejściowych przyjmuje plik z grafem zapisanym w postaci macierzy sąsiedztwa. W pierwszej linii pliku powinna znajdować się ilość wierzchołków.

```
5
0.0000  0.0000  0.0000  8.2700  0.0000
4.2000  0.0000  8.5200  0.0000  0.0000
3.0700  0.0000  0.0000  0.0000  7.7700
0.0000  0.0000  7.4900  0.0000  0.0000
9.5700  6.9400  7.7900  6.6900  0.0000
```

Listing 2: Przykładowy graf zapisany w odpowiednim formacie.

Do wygenerowania pliku w takim formacie można użyć skryptu pomocniczego `generateGraphs.py` opisanego w sekcji 5.6.

5.6 Generowanie grafów

W ramach projektu został udostępniony dodatkowy skrypt `generateGraphs.py`. Służy on do generowania grafów skierowanych o wybranej przez użytkownika liczbie wierzchołków i krawędzi. Znajduje się on w katalogu `\data`. Dostępne są opcje:

- `-h` - pomoc skryptu,
- `-e` - liczba krawędzi w grafie, jeśli wartość nie została podana, ustawiana jest wartość domyślna = 10,
- `-v` - liczba wierzchołków w grafie, wartość domyślna = 10,
- `-f` - nazwa pliku wyjściowego, domyślna nazwa to `graph.dat`.

Jeśli wartość krawędzi jest zbyt duża dla danej liczby wierzchołków, użytkownik zostaje o tym poinformowany i zostaje ustawiona nowa, losowa wartość. Wagi krawędzi są nieujemnymi liczbami rzeczywistymi, z zakresu $[0, 10]$.

```
generateGraphs.py [-h] [-e E] [-v V] [-f FILE]

optional arguments:
       -h, --help          show this help message and exit
       -e E, --edges E     number of edges
       -v V, --vertices V  number of vertices
       -f FILE, --file FILE  name of output file
```

Listing 3: Pomoc skryptu `generateGraphs.py`.

Grafy wygenerowane przy pomocy tego skryptu mogą zostać użyte jako dane wejściowe do programu.

Literatura

[1] Ananth Grama, Anshul Gupta, George Karypis, Vipin Kumar *Introduction to Parallel Computing, Second Edition*. Addison-Wesley, 2003.

[2] Aditya Pore, Russ Miller *Parallel implementation of Dijkstra's algorithm using MPI library on a cluster*. Link: `https://cse.buffalo.edu/faculty/miller/Courses/CSE633/Pore-Spring-2014-CSE633.pdf` (dostęp: 21.04.2020)

[3] Zilong Ye *An Implementation of Parallelizing Dijkstra's Algorithm*. Link: `https://cse.buffalo.edu/faculty/miller/Courses/CSE633/Ye-Fall-2012-CSE633.pdf` (dostęp: 21.04.2020)

[4] Wikipedia, The Free Encyclopedia *Dijkstra's algorithm* Link: `https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm` (dostęp: 21.04.2020)

[5] Dokumentacja MPICH: `https://www.mpich.org/documentation/guides/` (dostęp: 21.04.2020)

[6] Dokumentacja Microsoft MPI: `https://docs.microsoft.com/en-us/message-passing-interface/microsoft-mpi` (dostęp: 21.04.2020)

[7] Wes Kendall *MPI Tutorial: MPI Scatter, Gather, and Allgather*. Link: `https://mpitutorial.com/tutorials/mpi-scatter-gather-and-allgather/` (dostęp: 21.04.2020)

[8] Dokumentacja języka C++ dostępna na stronie `https://en.cppreference.com/w/` (dostęp: 21.04.2020)