

Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Informatyka



Mateusz Forczmański

Narzędzie do wizualizacji działań w sieciach przepływowych

Projekt inżynierski

Kierujący pracą: dr inż. Agnieszka Debudaj-Grabysz

Gliwice, 7 stycznia 2016

Spis treści

1	Wstęp	1
2	Analiza tematu	3
2.1	Podstawowe pojęcia	3
2.1.1	Definicja sieci przepływowej	3
2.1.2	Definicja przepływu sieci	3
2.1.3	Przepływ netto	3
2.1.4	Maksymalny przepływ w sieci	4
2.1.5	Sieć residualna	4
2.1.6	Warstwowa sieć residualna	5
2.2	Algorytmy znajdowania maksymalnego przepływu	6
2.2.1	Algorytm Forda-Fulkersona	6
2.2.2	Wykorzystanie przepływu blokującego	6
2.2.3	Algorytm Dinica	7
2.2.4	Algorytm MKM	7
2.3	Wykorzystane technologie	8
2.3.1	Język programowania	8
2.3.2	Środowisko deweloperskie	8
2.3.3	Format plików przy serializacji	8
2.3.4	Kontrola wersji	8
3	Wymagania	9
4	Specyfikacja zewnętrzna	11
4.1	Wymagania sprzętowe	11
4.2	Korzystanie z aplikacji	11
4.2.1	Tworzenie nowej sieci	12
4.2.2	Rysowanie grafu	12
4.2.3	Wykonanie algorytmów	14
4.2.4	Otwieranie i zapisywanie	15
5	Specyfikacja wewnętrzna	17
5.1	Struktura danych	17
5.2	Konfiguracja wyglądu sieci	17
5.3	Serializacja sieci	18
5.3.1	Format pliku XML	18
5.4	Algorytmy	19
5.4.1	Tworzenie sieci residualnej	19
5.4.2	Szukanie ścieżki powiększającej	19
5.4.3	Zwiększenie przepływu w sieci	21
5.4.4	Warunki stopu	21
5.4.5	Algorytm Forda-Fulkersona	22
5.4.6	Przepływ blokujący	22
5.4.7	Algorytm Dinica	22
5.4.8	Algorytm MKM	23

6 Testowanie i uruchamianie	25
6.1 Testowanie wyznaczania maksymalnego przepływu	25
6.2 Wyniki	25
7 Uwagi o przebiegu i wynikach prac	27
7.1 Nowe technologie	27
7.2 Zachowanie zasad SOLID	27
7.2.1 Zasada <i>Single responsibility</i>	27
7.2.2 Zasada <i>Open / closed</i>	28
7.2.3 Zasada <i>Liskov substitution</i>	28
7.2.4 Zasada <i>Interface segregation</i>	28
7.2.5 Zasada <i>Dependency inversion</i>	29
7.3 Rozwój aplikacji	29
8 Podsumowanie	31
Załączniki	35
A Przykład serializacji	37
B Tworzenie sieci residualnej	39
C Szukanie ścieżki w sieci	41
D Zwiększenie przepływu w sieci	43
E Warunki stopu	45
F Klasa algorytmu Forda-Fulkersona	47
G Realizacja algorytmu Floyda-Warshalla	49
H Usuwanie elementów nadmiarowych z sieci residualnej	51
I Zapełnianie przepływu blokującego	53
J Algorytm MKM	55
K Realizacja algorytmu Forda-Fulkersona	57
L Realizacja algorytmu Dinica	59
M Realizacja algorytmu MKM	63
Spis rysunków	67
Spis tablic	69

Rozdział 1

Wstęp

Sieć przepływową jest abstrakcyjnym modelem danych, który jest wykorzystywany do rozwiązywania problemów związanych z przepływem produktów. Podobnie jak w klasycznym problemie producenta i konsumenta, istnieje w systemie źródło, gdzie produkty są tworzone, oraz ujście, gdzie są konsumowane. W sieci przepływowej zakłada się, że produkty są generowane i użytkowane w tym samym tempie, więc problemem nie jest synchronizacja, ale ilość produktów jakie można maksymalnie przesyłać.

Intuicyjnie można wyobrazić sobie sieć przepływową jako układ hydrauliczny, gdzie krawędziami grafu są rury o stałej średnicy, wierzchołki są połączeniami rur, a dwa z nich są wyszczególnione jako miejsce wlewu oraz wylewu cieczy. Średnica każdej rury określa jej przepustowość, czyli maksymalną ilość cieczy jaka może przez nią przepłynąć. Połączenia są jedynie rozgałęzieniami - nie gromadzą płynu, jedynie przekazują go dalej. Innymi słowy, ilość cieczy jaka wpływa do rozgałęzienia musi być równa ilości jaka z niej wypływa. Jest to ta sama zasada co pierwsze prawo Kirchhoffa dla przepływu prądu w obwodzie elektrycznym.

Z siecią przepływową związany jest *problem maksymalnego przepływu*, czyli największej wartości produktów, jaka może przepłynąć w danej sieci ze źródła do ujścia. W ramach pracy inżynierskiej zaimplementowano trzy algorytmy służące do znajdowania maksymalnego przepływu w sieci: Forda-Fulkersona, Dinica oraz MKM (Malhotra, Kumar i Mahaswari). Zaprojektowana aplikacja ma mieć charakter edukacyjny: student, który będzie korzystał z programu powinien móc utworzyć własną sieć (wedle swojego zamysłu bądź odwzorować przykład z książki) oraz wykonać na niej jeden z algorytmów. Aplikacja ma na celu umożliwienie mu zrozumienie działania algorytmu krok po kroku, pracę na wielu sieciach oraz zapisanie swojego postępu.

Aby praca mogła spełnić swój walor edukacyjny, jej celem nie były tylko implementacje gotowych algorytmów. W jej ramach został utworzony graficzny interfejs użytkownika, który umożliwia wygodne poruszanie się po aplikacji, tworzenie sieci i obserwację działania algorytmów. Proces wykonywania algorytmów został zobrazowany poprzez podświetlanie odpowiednich wierzchołków i łuków, wyświetlanie struktur pośrednich, usuwanie niepotrzebnych elementów oraz wypisywanie komentarzy. Jeżeli utworzona przez użytkownika sieć nie spełnia teoretycznych założeń sieci przepływowych, zostaje on o tym poinformowany wraz z wiadomością, jakie błędy popełnił. Ponadto użytkownik może konfigurować wygląd swoich sieci przepływowych, odczytywać i modyfikować zapisane sieci, a także zapisać sieć z obliczonym maksymalnym przepływem.

W rozdziale drugim, **analizie tematu**, zostały przedstawione wszystkie najważniejsze pojęcia związane z teorią grafów i sieci przepływowych, o które została oparta praca. Zostały w nim również pokrótkie omówione wszystkie algorytmy, jakie zostały zrealizowane w tej pracy, wraz z pseudokodami oraz wyjaśniami ich działania. W rozdziale trzecim znajdują się **wymagania**, gdzie przedstawiono idee jak aplikacja powinna wyglądać od strony użytkownika oraz jakie funkcjonalności powinna zawierać. Rozdział czwarty jest **specyfikacją zewnętrzną**, gdzie szczegółowo opisano jak należy korzystać z utworzonej aplikacji. W rozdziale piątym zawarto **specyfikację wewnętrzną** w której przedstawiono i omówiono najważniejsze fragmenty kodu związane z implementacją algorytmów. Pokazano wszystkie istotne struktury danych, zależności między klasami, zastosowane wzorce projektowe oraz pseudokody rozwiązań problemów, jakie były konieczne do poprawnego działania programu. Rozdział szósty to **testowanie i uruchamianie**, gdzie krótko zaprezentowano kilka modeli testowych oraz rozwiązywanie na nich problemu wyszukiwania maksymalnego przepływu. W rozdziale siódmym znajdują się **uwagi o przebiegu pracy**, gdzie zostały przedstawione najważniejsze problemy jakie pojawiły się w czasie rozwoju aplikacji i ich rozwiązania, a także potencjalne rozszerzenia. W rozdziale ósmym zawarto **podsumowanie** pracy inżynierskiej.

Rozdział 2

Analiza tematu

2.1 Podstawowe pojęcia

2.1.1 Definicja sieci przepływowej

Sieć przepływowa $G = (V, E)$ jest grafem prostym skierowanym; strukturą, która składa się z dwóch zbiorów:

- n -elementowego zbioru wierzchołków $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$
- m -elementowego zbioru uporządkowanych łuków

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}, \quad \text{gdzie } e_i = (v_j, v_k); \quad i = 1, \dots, m; \quad v_j, v_k \in V$$

Każdy łuk jest parą wierzchołków należących do zbioru V .

Grafem prostym nazywamy taki graf w którym nie istnieją pętle. Pętlą nazywamy łuk (v_j, v_k) dla którego $v_j = v_k$. W sieci przepływowej wyróżnia się dwa wierzchołki: źródło $s \in V$ oraz ujście $t \in V$. W sieci przepływowej definiuje się ponadto funkcję przepustowości $c : E \rightarrow R_{\geq 0}$ odwzorowującą zbiór łuków w zbiór liczb rzeczywistych. Dodatkowo, w celu uproszczenia dziedziny, zakłada się, że z każdego wierzchołka $v \in V \setminus \{s, t\}$ istnieje ścieżka prowadząca ze źródła do ujścia. Założenie to ma zapewnić, że w rozpatrywanych sieciach będzie istniała co najmniej jedna ścieżka ze źródła do ujścia. Stopniem wejściowym wierzchołka nazywamy sumę łuków, jakie do niego wchodzą, a stopniem wyjściowym sumę łuków, jakie z niego wychodzą.

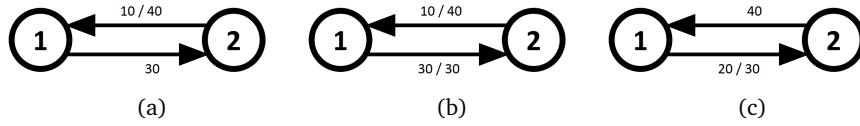
2.1.2 Definicja przepływu sieci

Przepływem w sieci przepływowej G jest funkcja f , która odwzorowuje zbiór łuków w zbiór liczb rzeczywistych $f : E \rightarrow R_{\geq 0}$ i spełnia następujące założenia:

1. Warunek przepustowości: $\forall_{v_i, v_j \in V} : f(v_i, v_j) \leq c(v_i, v_j)$.
Przepływ w żadnym z łuków nie może przekroczyć jego przepustowości.
2. Warunek skośnej symetryczności: $\forall_{v_i, v_j \in V} : f(v_i, v_j) = -f(v_j, v_i)$.
Przepływ w przeciwnym kierunku traktujemy tak jakby posiadał wartość ujemną.
3. Warunek zachowania przepływu: $\forall_{v \in V \setminus \{s, t\}} : \sum_{u \in V} f(v, u) = \sum_{u \in V} f(u, v)$.
Suma przepływów wpływających do wierzchołka musi być równa sumie przepływów wypływających z niego.

2.1.3 Przepływ netto

Przepływem netto nazywamy wartość funkcji przepływu $f(v_i, v_j)$ pomiędzy wierzchołkami v_i oraz v_j . Zgodnie z warunkiem skośnej symetryczności, wartość może być dodatnia lub ujemna. Dodatnia oznacza przepływ z wierzchołka v_i do wierzchołka v_j , natomiast ujemna - w przeciwnym kierunku. Sieć przepływna jest grafem skierowanym, więc dla dwóch wierzchołków może posiadać parę sąsiednich łuków. Poniższy przykład przedstawia istotę przepływu netto, jeżeli w obu sąsiadach istnieje niezerowy przepływ.



Rysunek 1: Zobrazowanie przepływu netto

Na rysunku 1a istnieje przepływ z wierzchołka 2 do wierzchołka 1 o wartości 10, czyli $f(2, 1) = 10$. Zgodnie z warunkiem skośnej symetryczności $f(1, 2) = f(2, 1) = -10$. Można powiedzieć, że wierzchołek 2 opuszcza 10 jednostek materiału, które wpływają do wierzchołka 1. Na rysunku 1b pojawia się drugi przepływ, z wierzchołka 1 do wierzchołka 2 przepływa 30 jednostek. W tym przypadku wartość przepływu w istocie jest równa $f(1, 2) = -10 + 30 = 20$. Jest to równoznaczne sytuacji, w której istnieje tylko przepływ 20 jednostek z wierzchołka 1 do wierzchołka 2, co przedstawia rysunek 1c. Przepływ z wierzchołka 2 do wierzchołka 1 zostaje zmniejszony do $f(2, 1) = 10 - 30 = -20$, co jest zgodne z warunkiem skośnej symetryczności.[Agn12]

2.1.4 Maksymalny przepływ w sieci

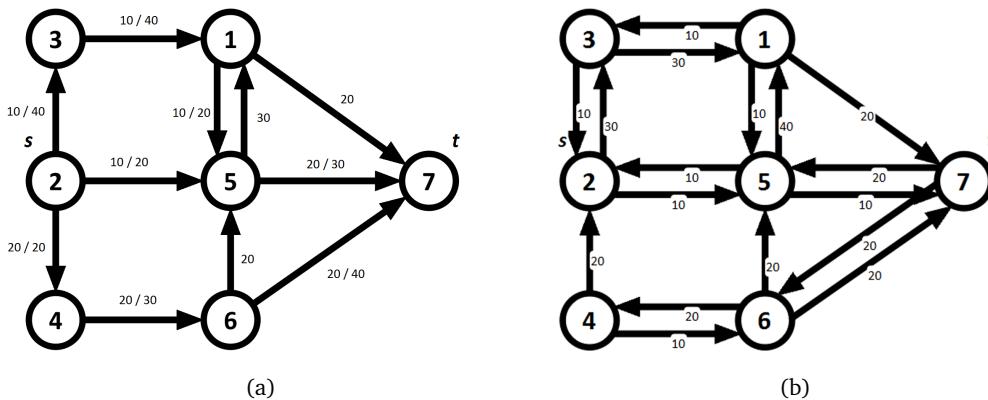
Wartość przepływu $|f|$ w sieci jest definiowana jako suma przepływów netto wychodzących ze źródła $\sum_{v \in V} f(s, v)$. Zgodnie z warunkiem zachowania przepływu, jest ona równa sumie wartości przepływów netto wpływających do ujścia $\sum_{v \in V} f(v, t)$. Problem maksymalnego przepływu polega na znalezieniu maksymalnej wartości $|f|$ w sieci przepływowej.[Agn12]

2.1.5 Sieć residualna

W celu wyznaczenia maksymalnego przepływu wprowadza się model sieci *residualnej*. To dodatkowa sieć przepływowa utworzona na podstawie pierwotnej. Aby zwiększyć przepływ w sieci obserwuje się stan łuków - jeżeli przepustowość łuku nie jest zapełniona jego przepływem netto, to oznacza, że przepływ może być zwiększony. Wprowadza się w tym celu pojęcie *przepustowości residualnej* $c_f(v_i, v_j)$, definiowanej jako różnica przepustowości i przepływu netto.

$$c_f(v_i, v_j) = c(v_i, v_j) - f(v_i, v_j)$$

Sieć residualną tworzy się w następujący sposób: dla każdego łuku (v_i, v_j) z sieci pierwotnej o przepływie f i przepustowości residualnej c_f tworzy się w sieci residualnej łuk (v_j, v_i) o przepustowości równej f oraz łuk (v_i, v_j) o przepustowości równej c_f . Jeżeli istnieje łuk sąsiedni dokonuje się ujednolicenia przepływu netto zgodnie z 2.1.3. W utworzonej tym sposobem sieci można zwiększyć przepływ jeżeli istnieje ścieżka ze źródła s do ujścia t . Zobrazowanie utworzenia sieci residualnej znajduje na rysunku 2.



Rysunek 2: Przykładowa sieć przepływowa i utworzona na jej podstawie sieć residualna

Może się zdarzyć, że w sieci residualnej będą istnieć łuki, które nie istnieją w sieci pierwotnej lub będą posiadać przepustowość większą niż łuki odpowiadające w sieci pierwotnej. Należy wówczas w trakcie zwiększania przepływu wykorzystać *przepływ zwrotny*, wynikający z warunku skośnej symetryczności, i zmniejszyć wartość przepływu netto w danym łuku.

Ścieżką powiększającą p w sieci residualnej nazywamy ścieżkę prostą (zbiór wierzchołków i łuków, gdzie każdy wierzchołek jest różny) ze źródła s do ujścia t . Maksymalną wartością o jaką można zwiększyć przepływ dzięki niej jest najmniejsza przepustowość residualna spośród wszystkich łuków należących do tej ścieżki.

$$c_f(p) = \min\{c_f(v_i, v_j) : \text{łuk } (v_i, v_j) \text{ należy do ścieżki } p\}$$

Jeżeli ścieżki powiększającej nie da się wyznaczyć w sieci residualnej, to oznacza, że aktualny przepływ f sieci pierwotnej jest maksymalny.

2.1.6 Warstwowa sieć residualna

Inny rodzaj sieci residualnej, zapisujemy ją jako $G_f^w = (V_f^w, E_f^w)$. Warstwowa sieć residualna oparta jest o ideę, że wyszukiwanie ścieżki powiększającej powinno odbywać się wyłącznie po najkrótszych możliwych ścieżkach, więc pewne wierzchołki i łuki nie będą do sieci należały. Niech $d_{min}(v, u)$ będzie najkrótszą możliwą odległością między wierzchołkami v i u w sieci residualnej $G = (V, E)$ ($v, u \in V$), liczoną w liczbie łuków pośredniczących. Z sieci residualnej G zostają usunięte:

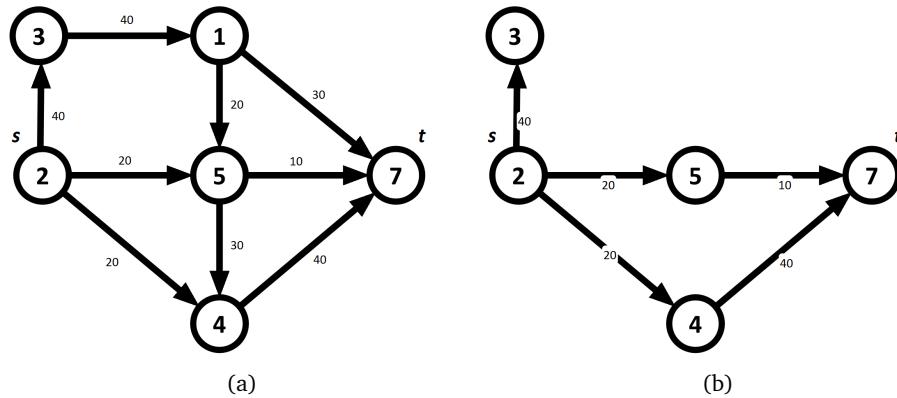
- Wszystkie wierzchołki inne niż źródło, dla których minimalna odległość ze źródłem jest większa niż odległość między źródłem, a ujściem.

$$V_f^w = V \setminus \{v \in V \setminus \{t\} : d_{min}(s, t) \leq d_{min}(s, v)\}$$

- Łuki, dla których ścieżka ze źródła s do wierzchołka docelowego v_i jest mniejsza lub równa ścieżce ze źródła s do wierzchołka początkowego v_j .

$$E_f^w = E \setminus \{(v_j, v_i) \in E : d_{min}(s, v_i) \leq d_{min}(s, v_j)\}$$

Powyższe warunki zapewniają, że każda ścieżka ze źródła s do dowolnego innego wierzchołka jest najkrótszą możliwą ścieżką. Pierwszy warunek gwarantuje nadmiarowych wierzchołków, a drugi łuków, które nie są częścią żadnej z najkrótszych ścieżek.



Rysunek 3: Zobrazowanie różnic między siecią residualną, a warstwową siecią residualną

Rysunek 3 prezentuje jak wygląda utworzenie warstwowej sieci residualnej (3b). W sieci residualnej (rys. 3a) $d_{min}(s, t) = 2$, ponieważ najkrótszą drogą jest $s \rightarrow 5 \rightarrow t$. Zgodnie z pierwszym warunkiem został usunięty wierzchołek 1, ponieważ $d_{min}(s, 1) = d_{min}(s, t) = 2$, a wraz z nim wszystkie łuki, które z niego wychodzą lub do niego prowadzą. Usunięty został również łuk $(5, 4)$, ponieważ $d_{min}(s, 4) = 1$ oraz $d_{min}(s, 5) = 1$, czyli droga ze źródła s do wierzchołka 4 nie będzie najkrótsza, gdy będzie przechodzić przez wierzchołek 5.[Agn12]

2.2 Algorytmy znajdowania maksymalnego przepływu

2.2.1 Algorytm Forda-Fulkersona

Algorytm 1 Wyznaczenie maksymalnego przepływu algorytmem Forda-Fulkersona

```

procedure ZNAJDŹ MAKSIMALNY PRZEPLYW(Sieć przepływową  $G = (V, E)$ )
    Wykonaj sieć residualną  $G_f$  dla sieci przepływowej  $G$ 
    while istnieje ścieżka powiększająca  $p$  w sieci  $G_f$  do
        Znajdź ścieżkę powiększającą  $p$  w sieci  $G_f$ 
         $c_f(p) = \min\{c_f(v_i, v_j) : \text{łuk } (v_i, v_j) \text{ należy do ścieżki } p\}$ 
        for all łuki  $(v_i, v_j) \in p$  do
             $f[v_i, v_j] += c_f(p)$ 
             $f[v_j, v_i] = -f[v_i, v_j]$ 
        end for
        Wykonaj sieć residualną  $G_f$  dla sieci przepływowej  $G$ 
    end while
    return  $f$ 
end procedure

```

Idea wyznaczania maksymalnego przepływu oparta jest o iteracyjne tworzenie sieci residualnej i szukania w niej ścieżki powiększającej. W każdej iteracji:

- tworzona jest sieć residualna G_f na podstawie sieci przepływowej G i jej aktualnego przepływu,
- znajdująca jest ścieżka powiększająca p w sieci residualnej,
- wartością powiększającą $c_f(p)$ jest najmniejsza przepustowość residualna wśród łuków w ścieżce p ,
- dla każdego łuku (v_i, v_j) ze ścieżki powiększającej p zwiększa przepływ w odpowiadającym łuku w sieci przepływowej G o wartość $c_f(p)$,
- dla każdego łuku sąsiadującego z łukiem (v_i, v_j) utwórz przepływ zwrotny.

W definicji algorytmu nie jest podany sposób wyznaczania ścieżki powiększającej, ponieważ nie ma on wpływu na wynik - przepływ zawsze jest maksymalny, z kolei wybór ma wpływ na czas wykonywania algorytmu [Agn12], [Tho09]. Przykładowe działanie algorytmu znajduje się w dodatku K.

2.2.2 Wykorzystanie przepływu blokującego

Przepływem blokującym f_b nazywamy taki przepływ w sieci, dla którego każda ścieżka ze źródła do ujścia posiada co najmniej jeden łuk nasycony. **Łukiem nasyconym** nazywamy taki łuk (v_i, v_j) , którego przepływu netto nie można już zwiększyć, $c(v_i, v_j) = f(v_i, v_j)$. Wykorzystanie warstwowej sieci residualnej 2.1.6 zapewnia, że każda ścieżka powiększająca w tej sieci będzie posiadać co najmniej jeden łuk nasycony. Dzięki temu można łatwo wyznaczyć przepływ blokujący w tej sieci szukając wszystkich możliwych ścieżek powiększających i składając je w jeden przepływ f_b . Zwiększenie przepływów netto w sieci pierwotnej traktujemy dokładnie tak samo jak dla zwykłej ścieżki powiększającej 2.1.3 [Agn12].

Działanie algorytmu poszukującego maksymalnego przepływu w sieci jest analogiczne do 2.2.1, ale zamiast sieci residualnej tworzy się warstwową sieć residualną, a zamiast ścieżki powiększającej - przepływ blokujący.

Algorytm 2 Wyznaczenie maksymalnego przepływu z wykorzystaniem przepływu blokującego

```

procedure ZNAJDŹ MAKSIMALNY PRZEPLYW(Sieć przepływową  $G = (V, E)$ )
    Wykonaj warstwową sieć residualną  $G_f^w$  dla sieci przepływowej  $G$ 
    while istnieje ścieżka ze źródła do ujścia w sieci  $G_f^w$  do
        Znajdź przepływ blokujący  $f_b$  w sieci  $G_f^w$ 
        Zwiększa przepływ  $f$  w sieci  $G$  o wartość  $f_b$ 
        Wykonaj warstwową sieć residualną  $G_f^w$  dla sieci przepływowej  $G$ 
    end while return  $f$ 
end procedure

```

2.2.3 Algorytm Dinica

Ten algorytm wykorzystuje wyznaczanie maksymalnego przepływu za pomocą warstwowej sieci residualnej oraz przepływu blokującego, opisane w 2.2.2. Definiuje sposób wyznaczania przepływu blokującego.

Algorytm 3 Wyznaczenie przepływu blokującego algorytmem Dinica

```

procedure WYZNACZ PRZEPŁYW BLOKUJĄCY(Warstwowa sieć residualna  $G_f^w = (V_f^w, E_f^w)$ )
    while istnieje ścieżka powiększająca  $p$  w sieci  $G_f^w$  do
        Wyznacz ścieżkę powiększającą  $p$  w sieci  $G_f^w$ 
         $c_f(p) = \min\{c_f(v_i, v_j) : \text{luk } (v_i, v_j) \text{ należy do ścieżki } p\}$ 
        for all łuki  $(v_i, v_j)$  należące do ścieżki  $p$  do
             $f_b[v_i, v_j] += c_f(p)$ 
             $c_f[v_i, v_j] -= c_f(p)$ 
            if  $c_f[v_i, v_j] = 0$  then
                Usuń łuk  $(v_i, v_j)$  z sieci  $G_f^w$ 
            end if
        end for
        Usuń wierzchołki  $v \in V_f^w$ , których stopień wejściowy lub stopień wyjściowy jest równy 0
    end while
    return  $f_b$ 
end procedure

```

Idea polega na usuwaniu w każdej iteracji łuków nasyconych z warstwowej sieci residualnej, a następnie wszystkich wierzchołków, które mają zerowy stopień wejściowy lub wyjściowy. Konstrukcja sieci zapewnia, że przy wyznaczaniu kolejnej ścieżki powiększającej w przepływie blokującym na pewno nie będzie ona przechodzić przez łuki nasycone oraz wierzchołki, które nigdzie nie prowadzą lub nie można do nich dojść, więc można je usunąć w celu przyspieszenia obliczeń [Agn12]. Przykładowe działanie algorytmu znajduje się w dodatku L.

2.2.4 Algorytm MKM

Podobnie jak algorytm Dinica, ten algorytm wykorzystuje przepływ blokujący do wyznaczania maksymalnego przepływu (rozdział 2.2.2) i jedyną różnicą jest definicja metody tworzenia go. Algorytm MKM do utworzenia przepływu blokującego nie używa ścieżek powiększających, ale wykorzystuje pojęcie *potencjału przepływowego wierzchołka* $p_f(v)$.

$$p_f(v) = \min\{p_f^{we}(v), p_f^{wy}(v)\}, \quad p_f^{we}(v) = \sum_{u \in V} c(u, v), \quad p_f^{wy}(v) = \sum_{u \in V} c(v, u)$$

Przez $p_f^{we}(v)$ określony jest potencjał wejściowy wierzchołka v (suma przepustowości łuków wchodzących), a przez $p_f^{wy}(v)$ potencjał wyjściowy wierzchołka v (suma przepustowości łuków wychodzących). Potencjał przepływowy jest mniejszą z tych dwóch wartości, czyli określa maksymalną wartość przepływu, jaka może zostać przetransportowana przez wierzchołek. Definiuje się ponadto, że $p_f^{we}(s) = \infty$ oraz $p_f^{wy}(t) = \infty$ [Agn12].

Algorytm 4 Wyznaczenie przepływu blokującego algorytmem MKM

```

procedure WYZNACZ PRZEPŁYW BLOKUJĄCY(Warstwowa sieć residualna  $G_f^w = (V_f^w, E_f^w)$ )
    Oblicz dla każdego wierzchołka  $v \in V_f^w$  potencjały  $p_f^{we}(v)$ ,  $p_f^{wy}(v)$ ,  $p_f(v)$ 
    repeat
        Znajdź wierzchołek  $v \in V_f^w$  o najmniejszym potencjale przepływowym  $p_f(v)$ 
        Utwórz ścieżkę  $v \rightarrow t$ , prześlij nią  $p_f(v)$  jednostek i uaktualnij  $f_b$ 
        Utwórz ścieżkę  $s \rightarrow v$ , prześlij nią  $p_f(v)$  jednostek i uaktualnij  $f_b$ 
        Oblicz dla każdego wierzchołka  $v \in V_f^w$  potencjały  $p_f^{we}(v)$ ,  $p_f^{wy}(v)$ ,  $p_f(v)$ 
        Usuń z sieci  $G_f^w$  wszystkie wierzchołki  $v \in V_f^w$  dla których  $p_f(v) = 0$ 
    until  $s \notin V_f^w$  lub  $t \notin V_f^w$ 
    return  $f_b$ 
end procedure

```

W każdej iteracji w warstwowej sieci residualnej G_f^w poszukuje się wierzchołka v o najmniejszym potencjale przepływowym. Następnie tworzy się dwie ścieżki: prowadzącą ze źródła s do wierzchołka v oraz z wierzchołka v do ujścia t , które razem tworzą ścieżkę powiększającą przechodzącą przez wierzchołek v . Następuje zwiększenie przepływu w G_f^w , a następnie usunięcie wszystkich wierzchołków o zerowym potencjale przepływowym i w konsekwencji łuków wchodzących i wychodzących z tych wierzchołków. Algorytm kończy pracę gdy zostanie usunięte źródło s lub ujście t . Przykładowe działanie algorytmu znajduje się w dodatku M.

2.3 Wykorzystane technologie

2.3.1 Język programowania

Aplikacja ma mieć charakter edukacyjny, więc na pierwszym planie nie stała efektywność wykonywania samych algorytmów, ale sposób prezentacji ich działania. Użytkownik korzystający z aplikacji powinien móc odwzorować w niej książkowy przykład sieci przepłybowej oraz móc zaobserwować jak każdy z interesujących go algorytmów wykonuje swoją pracę krok po kroku, jakie wprowadza zmiany w jego sieci i dlaczego. W tym celu zdecydowano się na platformę graficzną **Qt** oraz język programowania **C++**. Qt oferuje możliwość tworzenia prostych kształtów geometrycznych w grafice wektorowej; sieć tworzona przez użytkownika będzie tak samo czytelna w dowolnym przybliżeniu. Platforma Qt umożliwia również proste i wygodne w użyciu tworzenie okręgów, linii, łączenie ich w większe konstrukcje, zmiany parametrów, obsługę zdarzeń itp. Dzięki niej da się utworzyć pole edycyjne rysunku podobne do tych z takich aplikacji desktopowych jak *Inkscape* lub *Photoshop* oraz wygodne dla użytkownika tworzenie sieci przepłybowych przy pomocy kilku prostych narzędzi. Wybrana przez mnie wersja Qt to *Open Source*.

2.3.2 Środowisko deweloperskie

Decydując się na język C++ i platformę Qt istniała możliwość pracy w dwóch środowiskach IDE: *Visual Studio 2013* z wtyczką do Qt oraz *Qt Creator*. Zdecydowano się na środowisko *Visual Studio 2013*, aby móc w trakcie pracy skorzystać ze wszystkich dobrodziejstw kontroli kodu i debugowania, jakie oferuje produkt firmy Microsoft. Nie można było korzystać z najnowszego Visual Studio 2015, ponieważ w tym czasie wtyczka zespalająca VS z Qt, *Qt Visual Studio Add-in 1.2.4*, nie obsługiwała jeszcze tej wersji. Konsekwentnie aplikacja została napisana w *Qt 5.5* oraz skompilowana pod kompilatorem *MSVC v12.0 x64* na systemy Windows. Przez pewien czas nad rozwojem aplikacji pracowano z wtyczką *Resharper C++* (wersja próbna), która znacznie usprawniała pracę w środowisku Visual Studio. Tworząc okna i okienko dialogowe, z których korzysta aplikacja, korzystano dodatkowo z *Qt Designer*, który dawał możliwość komfortowego projektowania GUI w na tę platformę. Do pomocy ze statyczną analizą kodu korzystano dodatkowo z aplikacji *Cppcheck*.

2.3.3 Format plików przy serializacji

Jednym z podstawowych wymagań aplikacji jest możliwość zapisu i odczytu sieci przepłybowych z plików zewnętrznych. Zdecydowano się na zapisywanie ich do formatu *XML* bez szyfrowania pliku za pomocą funkcji mieszających. Format jest bardzo powszechny i posiada wsparcie w większości języków programowania, czy to w postaci bibliotek czy dzięki różnym platformom. Format pliku jest czytelny zarówno dla maszyny, jak i dla człowieka. Zmiany można wprowadzać edytując sam plik, dzięki temu możliwe jest wprowadzanie drobnych zmian zarówno przez użytkownika, który chciałby wprowadzić pewne zmiany bez otwierania aplikacji, jak i dla dewelopera, który chciałby testować i debugować w ten sposób działanie kodu parsującego.

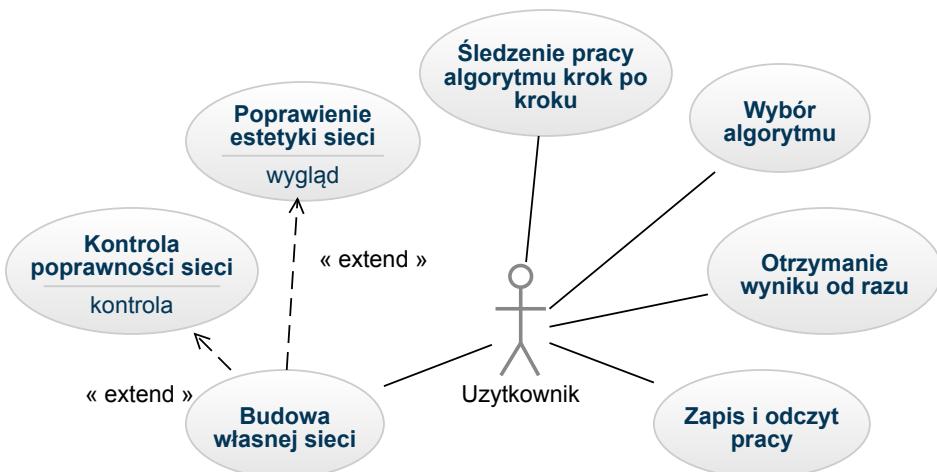
2.3.4 Kontrola wersji

Pracując nad aplikacją była potrzeba, aby mieć repozytorium kodu, na którym trzymano by kod źródłowy pracy inżynierskiej oraz można by obserwować i kontrolować jej rozwój, jak również móc wrócić do poprzednich wersji w przypadku popełnienia błędów. Zdecydowano się na repozytorium w systemie *Git* z wykorzystaniem klienta *Bitbucket*.

Rozdział 3

Wymagania

Aplikacja ma na celu pomóc użytkownikowi zrozumieć i zobrazować działanie algorytmów na sieciach przepływowych. Student, który przygotowuje się do kolokwium z przedmiotów związanych z algorytmiką powinien móc utworzyć własną sieć przepływową, prześledzić działanie wybranych algorytmów krok po kroku oraz móc zapisać postęp swojej pracy. Aplikacja ma mieć charakter edukacyjny, umożliwić jak najlepsze przyswojenie omawianych w pracy algorytmów. Wymagania zostały przedstawione w postaci przykładowów użycia na rysunku 4.



Rysunek 4: Funkcjonalności wymagane przez potencjalnego użytkownika

Ponadto aplikacja powinna zapewnić niezawodność wykonywanych algorytmów. Jeżeli sieci zbudowane przez użytkownika są niepoprawne i nie spełniają założeń, nie powinno dać się wykonywać algorytmów. Użytkownik powinien zostać poinformowany jakie dokładnie błędy popełnił w budowie i co należy zrobić by je wyeliminować. Jeżeli sieć jest poprawna, algorytm powinien móc dać się wykonać, a jego proces być łatwo kontrolowany przez użytkownika, najlepiej przy pomocy kilku przycisków. Wszystkie zmiany, jakie wprowadził algorytm w danym kroku powinny zostać opisane oraz podświetlone na grafie podgląadowym, jeżeli jest to możliwe. Algorytmy wyznaczania maksymalnego przepływu, opisane w rozdziale 2, tworzą struktury pośrednie i operują na nich, aplikacja powinna również zapewnić możliwość śledzenia wszystkich działań wykonanych na nich.

Czas oczekiwania na wykonanie pojedynczego kroku algorytmu powinien być krótki, nieprzekraczający kilku sekund, aby nie nadużywać cierpliwości użytkownika. Aplikacja powinna umożliwić śledzenie pracy algorytmu zarówno przez małe kroki, jak i skok do końca działania procesu i otrzymania wyniku natychmiastowo, np. w celu porównania go z obliczeniami na kartce.

Rozdział 4

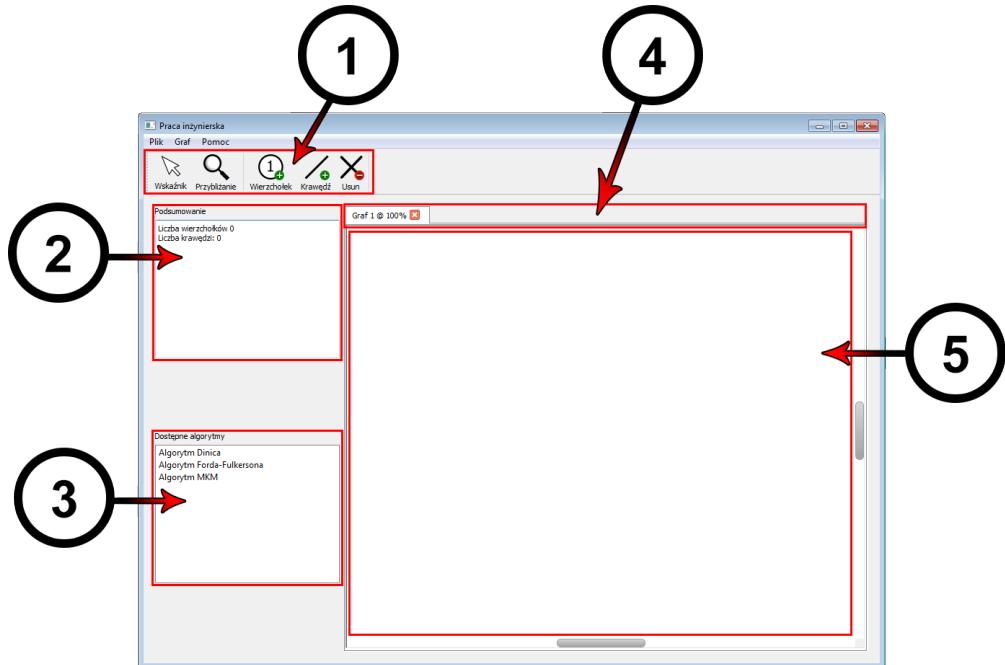
Specyfikacja zewnętrzna

4.1 Wymagania sprzętowe

Aplikacja działa pod systemami Windows 7 i nowszymi, na architekturze 64-bitowej. Instalacja nie jest wymagana, wystarczy otworzyć plik aplikacji .exe by móc z niej korzystać. Wszystkie biblioteki i pliki konfiguracyjne nie mogą zostać zmienione.

4.2 Korzystanie z aplikacji

Po uruchomieniu programu pojawia się okno z interfejsem graficznym złożonym z kilku podstawowych sekcji, które prezentuje rys. 5.

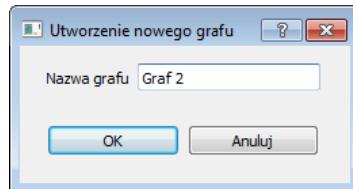


Rysunek 5: Interfejs graficzny

1. Pasek narzędziowy obejmuje pięć narzędzi do pracy z siecią przepływową: wskaźnik, lupa, dodanie grafu, dodanie krawędzi i usunięcie elementu.
2. Podsumowanie zawiera informacje na temat aktywnej w danej chwili sieci.
3. Dostępne algorytmy zawierają listę operacji, jakie można na sieci wykonać.
4. Pasek kart zawiera listę istniejących sieci w instancji aplikacji między którymi można się przełączać.
5. Pole edycji grafu to miejsce robocze, gdzie można umieszczać elementy grafu i pracować nad nimi.

4.2.1 Tworzenie nowej sieci

Aby utworzyć nową sieć należy z paska menu wybrać **Plik > Nowy** lub skorzystać ze skrótu **ctrl + N**. Następnie pojawi się okienko (rys. 6) w które należy wpisać roboczą nazwę sieci (można też pozostawić wygenerowaną domyślną nazwę). Po zatwierdzeniu zostanie dodana nowa karta z pustym polem edycyjnym.



Rysunek 6: Okienko z wyborem nazwy

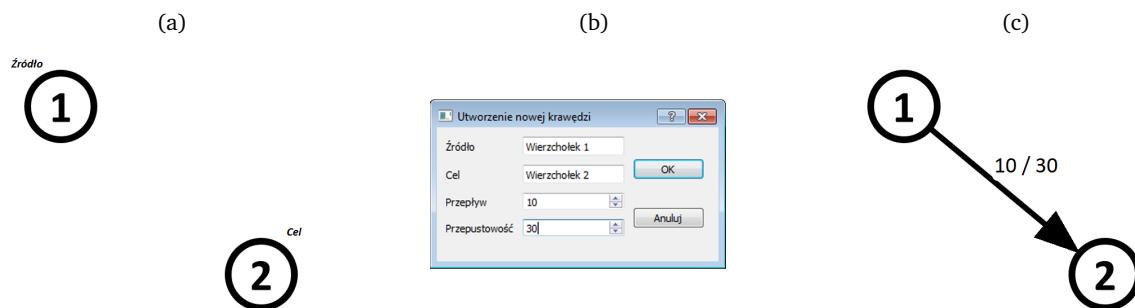
4.2.2 Rysowanie grafu

Dodanie wierzchołka

Aby dodać nowy wierzchołek należy wybrać narzędzie dodawania wierzchołków, a następnie kliknąć lewym przyciskiem myszy na puste miejsce w polu edycyjnym. Pojawi się nowy obiekt, miejsce kliknięcia będzie środkiem wierzchołka. Jeżeli klikniemy istniejący już obiekt, zostanie on zaznaczony.

Dodanie łuku

Aby móc dodać łuk na polu roboczym muszą istnieć co najmniej dwa wierzchołki. Należy wybrać narzędzie dodawania krawędzi i w pierwszej kolejności kliknąć na wierzchołek który będzie źródłem. Pojawi się nad nim etykieta "Źródło". Potem należy kliknąć drugi wierzchołek, po najechaniu myszką pojawi się nad nim etykieta "Ujście" (rys. 7a). Kliknięcie lewym przyciskiem myszy spowoduje potwierdzenie operacji i pojawienie okienka (rys. 7b), gdzie należy wpisać przepływ i przepustowość tego łuku, domyślnie zero i jeden. Jeżeli między wierzchołkami już istnieje dane połączenie, operacja zostanie zignorowana. Łuk jest na trwałe przymocowany do wierzchołków i nie można zmienić jego pozycji. Etykieta zawiera informację w formacie "przepływu / przepustowość" (rys. 7c).



Rysunek 7: Etapy dodawania łuku

Usuwanie elementów

W każdej chwili można usunąć wierzchołek lub łuk w sieci. W tym celu należy wybrać narzędzie usuwania oraz kliknąć wybrany element. Usunięcie łuku powoduje pozbycie się z sieci tylko niego, z kolei usunięcie wierzchołka powoduje zlikwidowanie wszystkich łuków, które wchodzą lub wychodzą z niego. Można usuwać wiele elementów naraz, narzędzie usuwa wszystko co jest zaznaczone.

Poprawa estetyki sieci

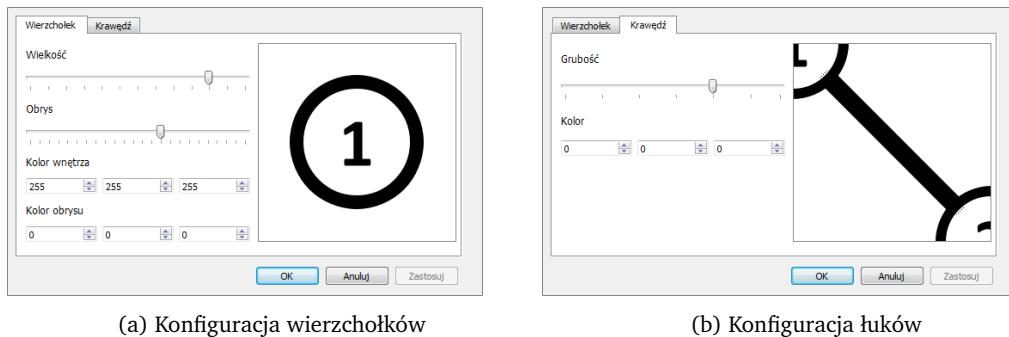
Aby poprawić wygląd i czytelność sieci istnieje możliwość wyrównania pozycji wierzchołków. Wszystkie wierzchołki w sieci posiadają te same rozmiary i dzięki temu można zastosować kilka sposobów ich wyrów-

nania. W tym celu należy zaznaczać dwa lub więcej wierzchołków, a następnie kliknąć jedną z kombinacji klawiszy:

- $\boxed{\uparrow} + \boxed{\uparrow}$ - ustawia pozycję pionową wszystkich wierzchołków równą pozycji wierzchołka najbardziej wysuniętego do góry.
- $\boxed{\uparrow} + \boxed{\downarrow}$ - ustawia pozycję pionową wszystkich wierzchołków równą pozycji wierzchołka najbardziej wysuniętego na dół.
- $\boxed{\uparrow} + \boxed{\leftarrow}$ - ustawia pozycję poziomą wszystkich wierzchołków równą pozycji wierzchołka najbardziej wysuniętego na lewo.
- $\boxed{\uparrow} + \boxed{\rightarrow}$ - ustawia pozycję poziomą wszystkich wierzchołków równą pozycji wierzchołka najbardziej wysuniętego na prawo.

Konfiguracja wyglądu grafu

Rozmiar i kolory wierzchołków oraz łuków można modyfikować w ustawieniach. W tym celu należy wybrać z paska menu **Graf > Kształt** lub skorzystać ze skrótu klawiszowego **ctrl + \uparrow + K**. Pojawi się okienko z konfiguracją lokalnego grafu (rys. 8).



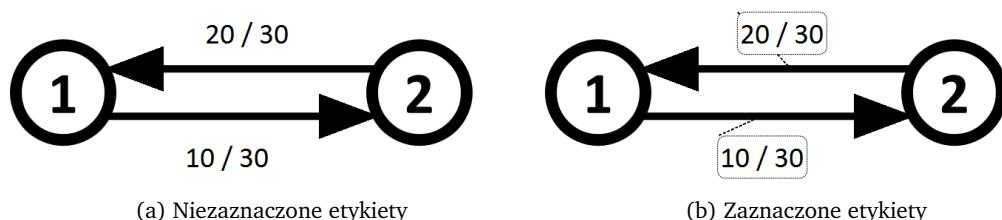
Rysunek 8: Możliwe zmiany w wyglądzie sieci

Oba okienka umożliwiają zmianę koloru i rozmiaru, w przypadku wierzchołka możliwa jest ponadto kontrola nad grubością obrusu oraz jego koloru. Kliknięcie przycisku *OK* lub *Zastosuj* skutkuje zapisaniem konfiguracji i aktualizacją wyglądu. Każda sieć posiada swoją lokalną konfigurację, w przypadku zapisywania jej do pliku, ona również jest zachowywana.

Operowanie na sieci

Wybierając narzędzie wskaźnika możliwe jest przesuwanie wierzchołków po polu edycyjnym oraz ich zaznaczanie. Można zaznaczyć wiele wierzchołków i łuk przytrzymując klawisz **ctrl** lub skorzystać z myszki - wystarczy kliknąć lewym przyciskiem na pustym polu, przytrzymać i przeciągnąć kurSOR by pojawił się prostokąt zaznaczający elementy sieci. Jeżeli jest wiele zaznaczonych elementów przesunięcie jednego z nich spowoduje przesunięcie wszystkich.

Zaznaczenie etykiety łuku, informującej o wartościach przepływu i przepustowości, spowoduje pojawienie się linii przerwanej prowadzącej do środka łuku (rys. 9). Ułatwia to pracę z siecią, gdy łuków i etykiet pojawi się coraz więcej.



Rysunek 9: Przedstawienie linii łączącej etykiety z łukiem

Zmiana parametrów łuku

Nad każdym łukiem znajduje się etykieta, która zawiera informację o wartościach kolejno przepływu i przepustowości oddzielone ukośnikiem. Jeżeli w etykiecie znajduje się jedna liczba, oznacza ona przepustowość. Wówczas wartość przepływu jest zerowa i dla czytelności nie jest wyświetlana. Te dwie wartości można w każdej chwili zmienić klikając dwukrotnie lewym przyciskiem myszy na etykiecie. Pojawi się pole edycji, gdzie można wprowadzić nowe wartości. Akceptowane są wyłącznie formaty <liczba> oraz <liczba>/<liczba>. Zmianę zatwierdza się kliknięciem myszy. Nowy łańcuch w poprawnym formacie spowoduje aktualizację wartości i etykiety. Wprowadzenie czegokolwiek innego powoduje przywrócenie pierwotnych wartości.

4.2.3 Wykonanie algorytmów

W momencie utworzenia karty z siecią, nowym lub wczytanym z pliku, w lewym dolnym rogu pojawia się lista dostępnych algorytmów, jakie można wykonać w ramach programu: Forda-Fulkersona, Dinica oraz MKM.

Warunki poprawności sieci

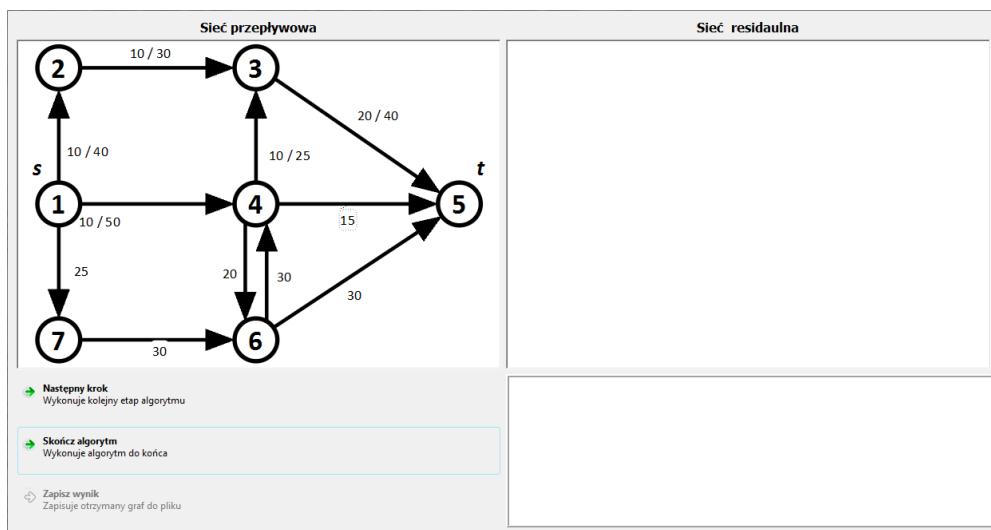
Aby uruchomić algorytm sieć musi być poprawnie zbudowana, tzn. spełniać następujące założenia:

- wierzchołek źródłowy oraz ujście muszą być oznaczone, by móc wyznać maksymalny przepływ. W tym celu należy kliknąć prawym przyciskiem myszki na wierzchołkach i wybrać z menu kontekstowego odpowiednio *oznacz jako źródło* oraz *oznacz jako ujście*. Nad wierzchołkiem źródłowym pojawi się etykieta *s*, a nad wierzchołkiem ujściowym etykieta *t*.
- Nie może istnieć żaden wierzchołek, inny niż źródło i ujście, przez który nie istnieje droga ze źródła do ujścia. Ma to na celu zapewnić, że w zbudowanym grafie istnieje co najmniej jedna ścieżka ze źródła do ujścia. Wystarczy, że dla każdego wierzchołka będą istniały co najmniej dwa łuki, wchodzący i wychodzący z niego.
- Zasada zachowania przepływu nie może zostać złamana. Program nie dopuszcza, żeby łuk mógł mieć większą wartość przepływu niż przepustowość, ale podczas budowania sieci nie można cały czas kontrolować tej zasady. Jest ona sprawdzana dopiero przy próbie uruchomienia algorytmu.

Jeżeli któryś z tych warunków nie zostanie spełniony, pojawi się okienko informujące dokładnie o rodzaju błędu oraz w którym miejscu grafu on wystąpił.

Okno wykonania

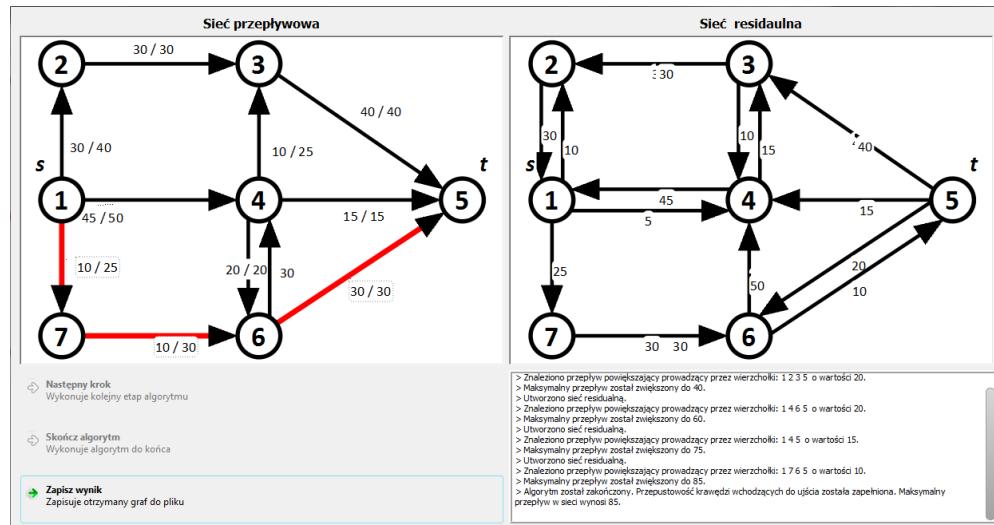
Jeżeli graf został poprawnie zbudowany, po kliknięciu w jeden z algorytmów pojawi się nowe okno (rys. 10) w którym zostanie on wykonany.



Rysunek 10: Okno ilustrujące przebieg algorytmu Forda-Fulkersona

Okno zostało podzielone na 4 obszary:

- W górnym lewym rogu znajduje się pierwotna sieć przepływową, której przepływ zostaje zwiększany wraz z kolejnymi krokami.
- W górnym prawym rogu jest podgląd tworzonej sieci residualnej oraz ścieżki powiększającej, jaka została w niej znaleziona. W oknie dla algorytmów Dinica i MKM znajduje się jeszcze dodatkowy, trzeci podgląd, obrazujący zmiany w warstwowej sieci residualnej.
- W dolnym lewym rogu znajdują się trzy przyciski:
 - *Następny krok*, jego naciśnięcie powoduje wykonanie istotnej instrukcji algorytmu i przedstawienie zaistniałych zmian w podglądarkach. *Skończ algorytm*, realizuje całość zadania, aż maksymalny przepływ zostanie znaleziony. Aplikacja wykonuje wówczas instrukcję *Następny krok* w odstępach równych 0.5 sekundy, aż do zakończenia obliczeń.
 - *Zapisz wynik*, przycisk staje się uaktywniony po zakończeniu zadania, umożliwia zapisanie sieci ze znalezionym maksymalnym przepływem do pliku XML.
- W dolnym prawym rogu znajduje się konsola w której pojawiają się informacje o przebiegu algorytmu. Za każdym razem, gdy instrukcja *Następny krok* zostanie wykonana, w tym polu pojawiają się szczegółowe informacje o utworzonych strukturach, znalezionych przepływach i innych zmianach w sieci. Przykładową ilustrację zmian w sieci zawiera rysunek 11.



Rysunek 11: Okno po zakończeniu wykonywania algorytmu

Przykładowe przedstawienie krok po kroku wyszukiwania maksymalnego przepływu znajduje się w do- datku K.

4.2.4 Otwieranie i zapisywanie

Aby móc zapisać sieć przepływową do pliku w sesji programu musi być otwarta co najmniej jedna karta. Klikając **ctrl**+**S** lub wybierając **Plik > Zapisz jako** można zapisać stan pracy do pliku XML. Program poprosi o wskazanie folderu oraz wpisanie nazwy pliku. Potwierdzenie utworzy nowy plik. Aby otworzyć plik należy wybrać z paska menu **Plik > Otwórz** lub skorzystać ze skrótu klawiszowego **ctrl**+**O**. Program otworzy okno dialogowe i poprosi o wskazanie pliku XML jaki ma otworzyć. Jeżeli ma on poprawny format, sieć przepływową zostanie wczytana i pokazana w nowej karcie.

Rozdział 5

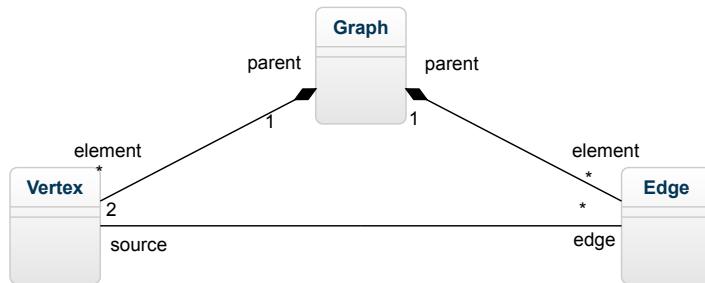
Specyfikacja wewnętrzna

5.1 Struktura danych

Reprezentację grafów w pamięci komputera można wykonać na dwa sposoby:

- **niskopoziomowy:** grafem jest macierz $n \times n$ liczb całkowitych, gdzie n to liczba wierzchołków.[Zbi10]
- **wysokopoziomowy:** wierzchołki i łuki grafu są wyodrębnione do osobnych klas.

W pracy inżynierskiej zostało wybrane drugie podejście, zależności między klasami prezentuje rysunek 12. Poprawne zdefiniowanie klas i zależności między nimi pozwala mi w intuicyjny sposób implementować algorytmy z pseudokodu: operacje rodzaju "wykonaj daną instrukcję na wszystkich łukach" można łatwo odwzorować pobierając kolekcję krawędzi i dodając im odpowiednią metodę. Nie ma potrzeby adaptować operacji na zupełnie inną strukturę.



Rysunek 12: Diagram klas struktury sieci

Zgodnie z definicją w 2.1.1, graf (*Graph*) składa się z dwóch zbiorów, wierzchołków (*Vertex*) oraz łuków (*Edge*). Graf jest kompozytem, wierzchołki i łuki stanowią jego ciało, a usunięcie obiektu grafu powoduje usunięcie jego wszystkich podległych elementów. Wierzchołek jest niezależnym elementem, z kolei łuk posiada referencje do dwóch obiektów klasy wierzchołka - łuk nie może istnieć bez pary wierzchołków, które go tworzą, a usunięcie wierzchołka powoduje usunięcie wszystkich łuków wychodzących i wchodzących do niego.

5.2 Konfiguracja wyglądu sieci

Każdy obiekt sieci przepływowej posiada swoją konfigurację, w której znajdują się informacje dotyczące rysowania sieci. Każda sieć musi posiadać istniejącą konfigurację, jest to wymuszone poprzez jej konstruktor.

```
explicit FlowNetwork(GraphConfig * config);
```

Wierzchołki i łuki sieci przepływowej podczas wydarzenia rysowania pobierają swoje ustawienia z rodzica. Klasa *GraphConfig* zawiera w sobie pięć składowych: nazwę sieci oraz cztery konteksty - sposób rysowania zwykłego elementu oraz zaznaczonego.

```

1 class GraphConfig
2 {
3     protected:
4         QString _name;
5         VertexContext * _normalVertexContext;
6         EdgeContext * _normalEdgeContext;
7         VertexContext * _selectedVertexContext;
8         EdgeContext * _selectedEdgeContext;
9 }

```

Informacje o sposobie rysowania wierzchołka są zawarte w klasie `VertexContext`, a łuki w klasie `EdgeContext`. Idea oparta jest o wzorzec *Pyłku*. Każdy obiekt wierzchołka i łuku posiada swój niezmienny stan wewnętrzny, jak identyfikator oraz pozycję, a także stan zewnętrzny, jakim jest kolor i kształt [Eri10]. Kontekst oznacza właśnie stan zewnętrzny, którymi grafy mogą się różnić. Każdy wierzchołek i łuk posiada swój wskaźnik na aktualny kontekst, a w momencie, gdy następuje kliknięcie w element grafu i mechanizm Qt wykrywa zmianę zaznaczenia, wskaźnik wskazuje na przeciwny kontekst.

```

1 QVariant VertexImage::itemChange(GraphicsItemChange change, const QVariant &value)
2 {
3     // ...
4     else if (change == ItemSelectedChange)
5     {
6         if (value.toBool() == true)
7         {
8             _context = getParent()->getConfig()->SelectedVertexContext();
9         }
10        else
11        {
12            _context = getParent()->getConfig()->NormalVertexContext();
13        }
14    }
15 }

```

5.3 Serializacja sieci

Zapis oraz odczyt plików z grafami odbywa się w klasie `GraphSerializer`. Posiada ona dwie publiczne metody:

- `void serialize(GraphImage const & graph, std::string const & fileName);`
Metoda `serialize` przyjmuje jako parametr referencję do graficznej reprezentacji grafu, który ma zapisać oraz nazwę pliku wyjściowego wraz ze ścieżką.
- `GraphImage * deserialize(std::string const & filePath);`
Metoda `deserialize` przyjmuje jako parametr ścieżkę do pliku, który ma odczytać. Zwraca wskaźnik do graficznej reprezentacji grafu odczytanego z pliku.

Sieci przepływowe są zapisywane do formatu XML. W celu obsługi tego języka, klasa `GraphSerializer` korzysta z darmowej biblioteki do parsowania plików XML, *RapidXML*, autorstwa Marcina Kalicińskiego¹

5.3.1 Format pliku XML

Plik zaczyna się od korzenia o nazwie `<Graph>`. Format pliku można podzielić na dwie części, konfiguracyjną (gałąź `<Config>`) i modelową (gałąź `<Model>`). W pierwszej znajdują się globalne ustawienia wyglądu, jak rozmiary i kolory wierzchołków i łuków. Druga część zawiera model sieci przepływowej - zarówno pozycje i numery wierzchołków, jak i ich połączenia poprzez krawędzie, ich kierunek, przepustowość, przepływ oraz położenie napisu z informacją. Przykładowa sieć przepływowa oraz jej serializacja do

¹Strona domowa *RapidXML*: <http://rapidxml.sourceforge.net/>

pliku znajduje się w dodatku A.

Przy realizacji serializacji konieczne było zapewnienie sprawdzenia poprawności pliku. Jeżeli nie posiada poprawnego formatu XML lub brakuje danych do utworzenia sieci, aplikacja sygnalizuje błąd i nie tworzy nowej karty. Za każdym razem, gdy klasa *GraphSerializer* potrzebuje w czasie deserializacji argumentu lub wartości, która nie istnieje w pliku XML, generowany jest wyjątek `std::runtime_error` z odpowiednim komunikatem, który zostaje wyświetlony w nowym oknie dialogowym.

5.4 Algorytmy

Wszystkie trzy algorytmy wykonane w tej pracy zostały wyodrębnione do osobnych klas. Ich klasą bazową bazową jest *FlowNetworkAlgorithm*, która definiuje interfejs algorytmów oraz zawiera wspólną dla wszystkich funkcjonalność.

5.4.1 Tworzenie sieci residualnej

Algorytm służący do wygenerowania sieci residualnej jest niezmienny dla wszystkich klas i jest zawarty w metodzie klasy *FlowNetworkAlgorithm*.

```
int makeResidualNetwork(FlowNetwork * network, FlowNetwork *& outResidualNetwork)
```

Funkcja przyjmuje dwa parametry:

- *network* jest siecią przepływową na podstawie której jest utworzona sieć przepływna
- *outResidualNetwork* jest referencją na wskaźnik do obiektu sieci, która będzie siecią residualną. W pierwszym kroku jest to głęboka kopia sieci przepływowej.

Wartością zwracaną jest najkrótsza odległość między źródłem, a ujęciem, jeżeli tworzona sieć jest *wartostową siecią residualną*. Jeżeli nie jest, funkcja zwraca zero. W pierwszym kroku, algorytm usuwa wszystkie łuki z wyjściowej sieci residualnej zostawiając same wierzchołki. Następnie przechodzi przez wszystkie łuki sieci przepływowej i wykonuje poniższy algorytm. Utworzenie tablicy odwiedzonych łuków ma za-

Algorytm 5 Tworzenie nowego łuku w sieci residualnej

```
procedure UTWÓRZ NOWY ŁUK(Łuk w sieci przepływowej)
    Oblicz przepustowość residualną
    if Istnieje łuk sąsiedni oraz łuk sąsiedni nie został odwiedzony then
        Oblicz przepływy między wierzchołkami zgodnie z zachowaniem przepływu netto w 2.1.3
        Dodaj łuk oraz łuk sąsiedni do odwiedzonych
    end if
    if Przepływ w łuku ≠ 0 then
        Utwórz nowy łuk w sieci residualnej w tym samym kierunku o przepustowości równej przepły-
        towi
    end if
    if Przepustowość residualna ≠ 0 then
        Utwórz nowy łuk w sieci residualnej w przeciwnym kierunku o przepustowości równej przepu-
        stowości residualnej
    end if
end procedure
```

pewnić, że w sieci residualnej nie zostaną utworzone nadmiarowe łuki gdy pętla dojdzie do sąsiada. Pełny kod algorytmu znajduje się dodatku B.

5.4.2 Szukanie ścieżki powiększającej

Podczas realizacji algorytmów wymagane jest znalezienie pewnej ścieżki pomiędzy źródłem, a ujęciem, jednak w literaturze ([Agn12],[Tho09]) nie jest podany żaden konkretny sposób. Udowodniono, że wybór algorytmu do szukania ścieżki nie ma wpływu na wynik działania omawianych algorytmów - uzyskana wartość przepływu zawsze jest maksymalna. Zastosowano algorytm poszukiwania ścieżek własnego pomysłu,

który został zaimplementowany w uogólnionej metodzie poszukującej drogi pomiędzy dwoma dowolnymi wierzchołkami sieci przepływowej.

```
QList<EdgeImage*> FlowNetworkAlgorithm::findPathBetween(FlowNetwork * network,
    ~ VertexImage * from, ~ VertexImage * to)
```

Funkcja przyjmuje trzy parametry:

- *network* jest siecią przepływową, która jest przeszukiwana.
- *from* jest wierzchołkiem startowym, z którego rozpoczętne jest szukanie ścieżki.
- *to* jest wierzchołkiem docelowym, do którego dąży algorytm.

Wartością zwracaną jest lista wskaźników na łuki w sieci, która stanowi reprezentację znalezionej ścieżki. Jeżeli lista jest pusta, ścieżka między wierzchołkami nie istnieje.

Algorytm 6 Poszukiwanie ścieżki między wierzchołkami

```
procedure ZNAJDŹ ŚCIEŻKĘ(Sieć, wierzchołek startowy, wierzchołek docelowy)
    Aktualnym wierzchołkiem jest startowy
    while Szukanie się nie zakończyło do
        for all łuk wychodzący z aktualnego wierzchołka do
            if jeżeli łuk nie prowadzi do źródła, odrzuconego lub odwiedzonego wierzchołka then
                Dodaj łuk do listy możliwych łuków
            end if
        end for
        if lista możliwych łuków jest pusta then
            if ostatni łuk jest nullem then return ścieżka
            else
                Dodaj aktualny wierzchołek do odrzuconych
                Usuń łuk z listy możliwych
                if ścieżka nie jest pusta then
                    Cofnij się do poprzedniego wierzchołka
                else
                    Aktualny łuk = null                                ▷ Aktualnym wierzchołkiem jest startowy
                    end if
                end if
            end if
        end if
        Wylosuj jeden z możliwych łuków
        Wierzchołek docelowy tego łuku jest aktualnym
        Dodaj aktualny wierzchołek do odwiedzonych
        Dodaj łuk do ścieżki
        Ostatnim łukiem jest aktualny
        if aktualny wierzchołek jest docelowym then
            zakończ algorytm
        end if
    end while return ścieżka
end procedure
```

Algorytm jest bardzo prosty. Zaczynając od pierwszego wierzchołka, losowany jest jeden z jego łuków. Jeżeli łuk prowadzi do wierzchołka docelowego, koniec. Jeżeli nie, przechodzimy do tego wierzchołka i losujemy kolejny łuk, tak długo aż cel zostanie znaleziony. W przypadku gdy dalsza droga nie istnieje, następuje cofnięcie się do poprzedniego wierzchołka, aktualny wierzchołek oraz droga do niego zostają oznaczone jako odrzucone. Następnie losowany jest kolejny łuk z dostępnych, jeżeli już ich nie ma, następuje kolejne cofnięcie o wierzchołek. Jeżeli algorytm powróci do wierzchołka startowego, to ścieżka między wierzchołkami nie istnieje i zostaje zwrócona pusta lista. Aby algorytm nie odrzucił pierwszej pętli, sprawdzane jest dodatkowo czy ostatni wybrany łuk nie jest wartością null. Pełny kod algorytmu znajduje się dodatku C.

Dzięki swojej losowości, za każdym razem droga między wierzchołkami, wyznaczona przez program, będzie inną. Dzięki temu ścieżki powiększające i przepływy blokujące, w trakcie poszukiwania maksymalnego przepływu, również mogą się różnić przy różnych wykonaniach algorytmu dla tej samej sieci. Nie ma tutaj jedynej słusznej drogi, jest jedynie jeden poprawny wynik.

5.4.3 Zwiększenie przepływu w sieci

Algorytm zwiększania przepływu jest wspólny dla wszystkich algorytmów znajdowania maksymalnego przepływu.

```
void FlowNetworkAlgorithm::increaseFlow(FlowNetwork *& network,
→ QList<EdgeImage*> const & path, int increase)
```

Funkcja przyjmuje trzy parametry:

- *network* jest siecią przepływową, gdzie przepływ zostanie zwiększyony
- *path* to zbiór łuków w których przepływ zostanie zwiększyony
- *increase* jest wartością o jaką przepływy zostaną zwiększone

Algorytm 7 Zwiększenie przepływu w sieci

```
procedure ZWIEKSZ PRZEPLYW(Sieć, ścieżka, wartość powiększająca)
  for all łuk w ścieżce do
    if nie istnieje odpowiadający łuk w sieci then
      Utwórz przepływ zwrotny w sąsiednim łuku
    else if istnieje odpowiadający łuk w sieci, ale posiada łuk sąsiedni then
      Wykonaj optymalizację przepływu netto zgodnie z 2.1.3
    else
      Zwiększ przepływ w odpowiadającym łuku w sieci o wartość powiększającą
    end if
  end for
end procedure
```

Algorytm musi uwzględniać trzy przypadki. Najprostszy występuje wtedy, gdy sieć posiada odpowiadający łuk, a ten nie posiada łuku sąsiedniego. Wówczas wystarczy jedynie zwiększyć przepływ. Jeżeli łuk posiada sąsiada, należy zwiększyć przepływ i dokonać wyrównania wartości. Może też zdarzyć się przypadek, że sieć residualna będzie posiadać łuki, które w sieci przepłybowej nie istnieją, zgodnie z 2.1.5. Wówczas należy dokonać przepływu zwrotnego, czyli zmniejszyć wartość przepływu w łuku, który dokonuje przepływu między wierzchołkami, ale w przeciwnym kierunku (który zgodnie z założeniami musi istnieć). Pełny kod algorytmu znajduje się dodatku D.

5.4.4 Warunki stopu

Poszukiwanie maksymalnego przepływu zostaje zakończone gdy zostanie spełniony jeden z warunków:

1. Suma przepływów w łukach wychodzących ze źródła jest równa sumie ich przepustowości,
2. Suma przepływów w łukach wchodzących do ujścia jest równa sumie ich przepustowości,
3. Algorytm znajdowania ścieżki powiększającej [5.4.2] zwrócił pustą listę łuków.

Pełna treść funkcji, które je sprawdzają znajdują się dodatku E.

5.4.5 Algorytm Forda-Fulkersona

Algorytm został zamknięty w klasie *FordFulkersonAlgorithm*, która dziedziczy po *FlowNetworkAlgorithm*. Pseudokod tego algorytmu znajduje się w rozdziale 2.2.1. Jest to najprostsza z metod znajdowania maksymalnego przepływu i korzysta wyłącznie z metod odziedziczonych po klasie *FlowNetworkAlgorithm*:

- tworzenia sieci residualnej 5.4.1,
- znajdowania ścieżki powiększającej 5.4.2,
- zwiększania przepływu 5.4.3.

W pętli wykonywane są powyższe trzy instrukcje w kolejności w jakiej zostały wymienione. Efektem działania algorytmu jest sieć z maksymalnym przepływem. Pełny kod klasy tego algorytmu znajduje się dodatku F.

5.4.6 Przepływ blokujący

W klasie *BlockingFlowAlgorithm* została zawarta cała logika związana z tworzeniem przepływu blokującego. Znajdują się tutaj wszystkie funkcje, które są wymagane do wykonania przepływu. Zgodnie z teorią zawartą w 2.2.2 do wykonania przepływu blokującego potrzebna jest informacja o odległościach pomiędzy wierzchołkiem źródłowym, a wszystkimi pozostałymi. Informacja ta jest przechowywana w macierzy liczb zmiennoprzecinkowych $n \times n$, gdzie n to liczba wierzchołków.

```
typedef std::vector<std::vector<float>> FloatMatrix;
class BlockingFlowAlgorithm
{
protected:
    FloatMatrix _pathMatrix;
}
```

Z kolei do wyznaczenia odległości między wierzchołkami został wykorzystany algorytm Floyda-Warshalla [Zbi10], który wyszukuje odległości między wszystkimi parami wierzchołków. W sieci przepływowej odległość między wierzchołkami połączonymi przez łuk jest równa jeden. Implementacja funkcji znajduje się w dodatku G.

5.4.7 Algorytm Dinica

Algorytm został zwarty w klasie *DinicAlgorithm* dziedziczącej po klasach *FlowNetworkAlgorithm* oraz *BlockingFlowAlgorithm*. Implementacja tego algorytmu różni od implementacji algorytmu Forda-Fulkersona 5.4.5 tworzeniem sieci residualnej, która jest warstwowa. W efekcie klasa tworzy sieć residualną metodą odziedziczoną po *FlowNetworkAlgorithm*, a następnie usuwa zbędne elementy w metodzie odziedziczonej po *BlockingFlowAlgorithm*.

```
int DinicAlgorithm::makeResidualNetwork(FlowNetwork * network, FlowNetwork *&
                                         → residualNewtork)
{
    FlowNetworkAlgorithm::makeResidualNetwork(network, residualNewtork);
    return removeRedundantElements(residualNewtork);
}
```

Funkcja *removeRedundantElements* usuwa z przekazanej sieci residualnej nadmiarowe elementy. W tym celu pobiera z tablicy *_pathMatrix* (5.4.6) potrzebne wartości i porównuje je zgodnie z warunkami opisanymi w 2.1.6. Pełna treść tej funkcji znajduje się w dodatku H.

Algorytm Dinica wykorzystuje wyszukiwanie ścieżki powiększającej do zwiększania przepływów w warstwowej sieci residualnej. Po utworzeniu przepływu blokującego, który na początku każdej iteracji jest głęboką kopią warstwowej sieci residualnej, wyszukiwane są w nim wszystkie istniejące ścieżki powiększające z wykorzystaniem algorytmu opisanego w 5.4.2. Uzyskane ścieżki zapisują się do wektora ścieżek powiększających, a na koniec realizuje je wszyskie zwiększaając przepływ w taki sam sposób jaki opisano w 5.4.3, z tą tylko różnicą, że wykonuje się je w pętli. Kod tego procesu został przedstawiony w dodatku I.

5.4.8 Algorytm MKM

Ten algorytm wykorzystuje pojęcie potencjału przepływowego 2.2.4, więc jego klasa wymaga utworzenia dodatkowej składowej. Do każdego wierzchołka należy dodać informację o jego trzech potencjałach (wejściowym, wyjściowym i ogólnym), więc wykorzystano strukturę `std::tuple`. Wartościami są liczby zmiennoprzecinkowe, które umożliwiają stosowanie nieskończoności (`std::numeric_limits`).

```
typedef QMap<int, std::tuple<float, float, float>> PotentialMap;
class MkmAlgorithm : public FlowNetworkAlgorithm, public BlockingFlowAlgorithm
{
    PotentialMap _potentialMap;
}
```

Mapa potencjałów, gdzie kluczem jest id wierzchołka, jest aktualizowana w każdej iteracji, natychmiast po utworzeniu warstwowej sieci residualnej. Ta klasa wymagała gruntowanej zmiany zwiększania przepływu w przepływie blokującym: w każdej iteracji najpierw musi wyszukać wierzchołek o najmniejszym potencjale, z niego poprowadzić dwie ścieżki, do źródła oraz do ujścia, jak również sprawdzić nowy warunek stopu. W aplikacji jest to zrealizowane w następujący sposób:

Algorytm 8 Tworzenie przepływu blokującego algorytmem MKM

```
procedure ZNAJDŹ ŚCIEŻKĘ POWIĘKSZAJĄCĄ(Sieć  $G_f^w$ , referencja na przepustowość residualną  $c$ )
repeat
    Wyczść obie ścieżki
    Znajdź nieodrzucony wierzchołek  $v$  o najmniejszym, niezerowym potencjale w sieci  $G_f^w$ 
    if jeżeli taki wierzchołek nie istnieje then
        Wyjdź z pętli
    end if
    Znajdź ścieżkę z wierzchołka  $v$  do ujścia  $t$ 
    Znajdź ścieżkę ze źródła  $s$  do wierzchołka  $v$ 
    if jedna ze ścieżek jest pusta then
        Odrzuć wierzchołek
    else
         $c = \text{potencjał wierzchołka } v$ 
        Zwiększ maksymalny przepływ o  $c$ 
    end if
    until ścieżka ze źródła = 0 lub ścieżka do ujścia = 0
    return suma ścieżki ze źródła i ścieżki do ujścia
end procedure
```

Dwie ścieżki, ze źródła do wierzchołka i z wierzchołka do źródła, jakie zostały opisane w definicji algorytmu (2.2.4), tak naprawdę tworzą razem pojedynczą ścieżkę powiększającą. W implementacji zostało to wykorzystane i w każdej iteracji zwracana jest suma obu zbiorów - tworzona jest pojedyncza ścieżka o jednej przepustowości residualnej. Dzięki temu nie było potrzeby ani zmiany interfejsu ani skorzystania ze wzorca Adaptera.

Algorytm wykonywany jest tak długo aż zostanie znaleziona ścieżka przepływową, czyli jest droga ze źródła do ujścia prowadzącą przez wierzchołek v . Algorytm kończy swe poszukiwanie również wtedy jeżeli nie istnieje wierzchołek, który miałby niezerowy potencjał. Po każdej iteracji uzyskana ścieżka dodawana do jest listy ścieżek powiększających wraz ze swoją przepustowością residualną, tak jak w implementacji algorytmu Dinica 5.4.7.

Wierzchołkami odrzuconymi są te znalezione wierzchołki, przez które nie prowadzi żadna ścieżka powiększająca. Mogą takie się znaleźć w warstwowej sieci residualnej i są dodawane do listy odrzuconych, by nie przechodzić przez nie w kolejnych iteracjach. Pełna treść tej procedury znajduje się w dodatku J.

Rozdział 6

Testowanie i uruchamianie

6.1 Testowanie wyznaczania maksymalnego przepływu

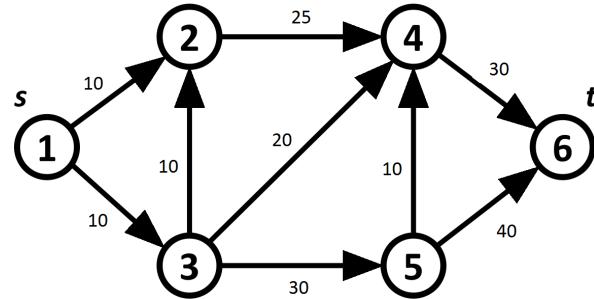
W ramach testowania poprawności działania algorytmów wyznaczania maksymalnego przepływu zostało utworzonych kilka podręcznikowych sieci przepływowych, które były modelem do testowania algorytmów.

1. Na rys. 13 znajduje się sieć przepływowa, w której suma przepływów netto wychodzących ze źródła jest mniejsza niż suma przepływów netto wchodzących do ujścia, $\sum_{v \in V} c(s, v) < \sum_{v \in V} c(v, t)$. Łuki pośredniczące posiadają wystarczającą dużą przepustowość aby móc przenieść cały przepływ wychodzący ze źródła do krawędzi wchodzących do ujścia. Test oczekuje, że maksymalny przepływ sieci $|f|$ będzie mieć wartość nie większą niż $\sum_{v \in V} c(s, v) = 10 + 10 = 20$.
2. Na rys. 14 znajduje się sieć o podobnej strukturze, tym razem $\sum_{v \in V} c(s, v) > \sum_{v \in V} c(v, t)$. Łuki pośredniczące tak samo są w stanie przenieść sumę przepływów wychodzących ze źródła do krawędzi wchodzących do ujścia, więc test oczekuje, że przepływ sieci $|f|$ będzie mieć wartość nie większą niż $\sum_{v \in V} c(v, t) = 30 + 10 = 40$.
3. Na rys. 15 przedstawiono strukturę w której $\sum_{v \in V} c(s, v) = \sum_{v \in V} c(v, t)$, ale łuki pośredniczące nie są w stanie przenieść całego przepływu. Dla łuku $(s, 2)$, gdzie $c(s, 2) = 40$, jedyna ścieżka do ujścia prowadzi przez $s \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow t$, gdzie przepustowość residualna tej ścieżki jest równa $c(2, 4) = 10$. Z kolei dla łuku $(s, 3)$, gdzie $c(s, 3) = 30$, ścieżki prowadzące do ujścia (przy założeniu, że łuk $(2, 4)$ został nasycony w poprzednim kroku) to $s \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow t$ o przepustowości residualnej równej $c(3, 4) = 20$ oraz $s \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow t$ o przepustowości residualnej równej $c(3, 5) = 10$. Podsumowując, test oczekuje, że przepływ sieci $|f|$ będzie mieć wartość nie większą niż suma przepustowości residualnych tych trzech ścieżek, $10 + 20 + 10 = 40$.

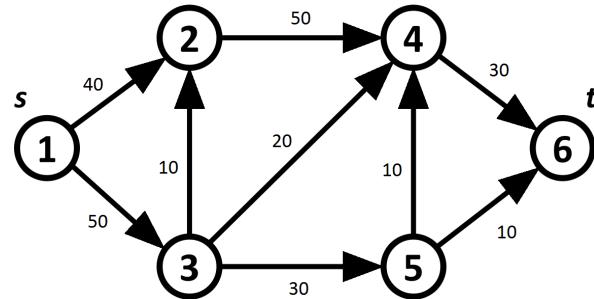
Wszystkie przypadki testowe zostały sprawdzone poprzez statyczne wprowadzenie sieci do aplikacji oraz ręczne uruchomienie algorytmów. Wyniki zostały przedstawione w tabelach 6.1, 6.2 i 6.3. Obliczenia zostały wykonane na komputerze z procesorem *Intel Celeron G530 2x 2.4 GHz*, 6 GB pamięci RAM i systemem *Windows 7 x64*.

6.2 Wyniki

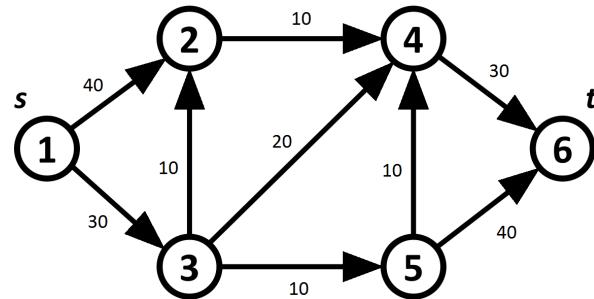
Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabelach 6.1, 6.2 i 6.3 we wszystkich sieciach przepływowych został obliczony maksymalny przepływ, który spełniał teoretyczne założenia opisane w rozdziale 6.1. Z kolumną *czas wykonania* wynika, że najefektywniejszym algorytmem jest algorytm MKM, który dla najbardziej trudnego przypadku (zakończenie algorytmu przez zauważenie zapełnienia łuków pośrednich) wykonał się zdecydowanie najszybciej, ponad dwa razy szybciej niż algorytm Forda-Fulkersona. Algorytm Dinica zajmuje drugie miejsce, jest o wiele efektywniejszy niż algorytm Forda-Fulkersona, ale trochę wolniejszy niż MKM. Z kolei dla pierwszej sieci czas wykonania algorytmów jest w przybliżeniu taki sam, ze wskazaniem na algorytm Forda-Fulkersona jako najlepszy. Stało się tak dlatego, że w tym przypadku łuki wychodzące ze źródła szybko się nasycają i algorytm Forda-Fulkersona wykonuje się trochę szybciej, ponieważ tworzy mniej złożone struktury.



Rysunek 13: Sieć z ograniczeniem przepływu u źródła



Rysunek 14: Sieć z ograniczeniem przepływu u ujścia



Rysunek 15: Sieć z ograniczeniem przepływu między źródłem, a ujściem

Algorytm	Maksymalny przepływ	Czy prawidłowy?	Czas wykonania [ms]
Forda-Fulkersona	20	Tak	132
Dinica	20	Tak	136
MKM	20	Tak	137

Tablica 6.1: Wyniki testu dla sieci na rys. 13

Algorytm	Maksymalny przepływ	Czy prawidłowy?	Czas wykonania [ms]
Forda-Fulkersona	40	Tak	221
Dinica	40	Tak	149
MKM	40	Tak	144

Tablica 6.2: Wyniki testu dla sieci na rys. 14

Algorytm	Maksymalny przepływ	Czy prawidłowy?	Czas wykonania [ms]
Forda-Fulkersona	40	Tak	435
Dinica	40	Tak	250
MKM	40	Tak	201

Tablica 6.3: Wyniki testu dla sieci na rys. 15

Rozdział 7

Uwagi o przebiegu i wynikach prac

W końcowej wersji aplikacji udało się spełnić wszystkie wymagania opisane w 3: tworzenie sieci przepływowych, ich serializację oraz algorytmy wyszukiwania maksymalnego przepływu. Wszystkie funkcjonalności zostało wielokrotnie przetestowane, chociaż bez testów automatycznych.

7.1 Nowe technologie

Język C++ został poznany w toku studiów, jednak platforma Qt, która została wybrana w rozdziale 2.3.1 jako wykorzystana platforma graficzna, nie znajdowała się w programie studiów inżynierskich. Musiano poświęcić dużo dodatkowego czasu na samo zapoznanie się z technologią, w szczególności zrozumienie działania sygnałów i slotów jako podstawowej metody komunikacji pomiędzy widżetami. Dodatkowej pracy wymagało ponadto zsynchronizowanie platformy Qt z Visual Studio poprzez dodatek. Aby było to możliwe należało pobrać cały kod źródłowy Qt (poprzez konsolę Git i skrypty napisane w Perl) na lokalny dysk i zbudować całość kompilatorem jaki był wykorzystany w trakcie pracy (MSVC v12.0 x64). Tylko w tak skompilowanym Qt można było tworzyć programy i debugować je w Visual Studio.

W trakcie pracy nad aplikacją wielokrotnie pojawiała się potrzeba bądź chęć skorzystania z gotowych bibliotek do wykonania pewnych funkcjonalności, m.in. parsowanie plików XML opisane w 5.3. Ponadto w aplikacji wykorzystano niektóre możliwości zbioru bibliotek **Boost**, m.in. bibliotekę *lexical_cast*, która umożliwia wygodną i bardzo bezpieczną konwersję elementarnych typów danych. Wykorzystano również bibliotekę **libconfig**, której możliwości i czytelny format plików wejściowych wykorzystano do stworzenia prostego pliku konfiguracyjnego całej aplikacji. Jednak w przeciwieństwie do bibliotek Boost, libconfig był dołączany dynamicznie i skompilowana biblioteka DLL musi być dołączona do wersji *release* aplikacji.

7.2 Zachowanie zasad SOLID

Aplikacja była pisana z myślą o potencjalnych zmianach i rozszerzeniach, jakie mogą w niej zajść. W trakcie pracy nad rozwojem aplikacji starano się przestrzegać pięciu zasad określonych przez koncept SOLID [Rob10][Rob05], ponieważ największymi problemami napotkanymi w czasie pracy były te związane z zaprojektowaniem aplikacji. Jaką strukturę powinna mieć sieć przepływna, jak rozdzielić logikę od reprezentacji, jakie wzorce projektowe zastosować itp.

7.2.1 Zasada *Single responsibility*

Pierwsza i najcięższa do zachowania zasada SOLID dotyczy pojedynczej odpowiedzialności. Mówiąc, że klasy powinny być niewielkie i zajmować się atomową funkcjonalnością aplikacji. Klasy utworzone w tej pracy inżynierskiej są bardzo duże, czasem posiadają ponad sto linijek w samym pliku nagłówkowym. Klasa *GraphSerializer*, która odpowiada za cały proces serializacji i deserializacji sieci przepływnych zawiera łącznie ponad 700 linijek kodu, lecz ciężko było tego uniknąć. Mimo to, starano się przestrzegać zasad pojedynczej odpowiedzialności, m.in. reprezentacja łuku składa się z dwóch klas, *EdgeImage* oraz *ArrowHeadImage*, gdzie osobno są przechowywane informacje o linii i grocie.

7.2.2 Zasada *Open / closed*

W pracy zostały zrealizowane jedynie sieci przepływowne, które są tylko jednym z wielu rodzajów grafów. Aplikacja była pisana z myślą, że w przyszłości może zostać rozszerzona do prezentacji innych algorytmów, na innych strukturach grafowych. Dlatego została utworzona klasa nadziedziona *GraphImage* reprezentująca każdy typ grafu. Elastyczną rozszerzalność starano się zapewnić wykorzystując wzorce projektowe. O tym, czy graf jest ważony (posiada funkcję odwzorowującą jego zbiór krawędzi w zbiór liczb), decyduje odpowiedni obiekt klasy *strategii* [Eri10], który jest wstrzykiwany do grafu. Sieć przepływna zawsze posiada strategię grafu ważonego. Zbiór narzędzi do edycji grafu, który przedstawia pasek narzędziowy, został oparty o wzorzec *stanu* [Eri10]. Z punktu widzenia klas zewnętrznych narzędzie jest tylko jedno, pod wpływem naciśnięcia przycisku zmienia ono tylko swój stan wewnętrzny. Dzięki temu, aby dodać kolejne narzędzie, nie trzeba modyfikować istniejącego kodu, wystarczy jedynie utworzyć nową klasę - funkcjonalność jest odporna na zmiany, otwarta na rozszerzenia. Każda klasa narzędzia jest *singletonem* [And11], w całej aplikacji potrzebne są wyłącznie pojedyncze egzemplarze. Lista algorytmów, jaka wyświetlane jest w okienku "Dostępne algorytmy", oparta jest o *fabrykę obiektów*. Klasa algorytmów do wyszukiwania maksymalnego przepływu same się w niej rejestrują przy uruchomieniu programu ([And11]), a przy wybraniu jednego z nich jest pobierany wskaźnik do metody fabrykującej, która tworzy użytkowany obiekt algorytmu. W konsekwencji tego dodanie kolejnego algorytmu wymaga jedynie utworzenia nowej klasy. Fabryka również jest singletonem, potrzeba tylko jednej utworzonej na początku pracy aplikacji.

7.2.3 Zasada *Liskov substitution*

Hierarchia dziedziczenia w aplikacji nie jest duża, ale zdarzały się momenty, kiedy i ta zasada była łamana. Tworząc konstruktor sieci przepływowej (klasa *FlowNetwork*), dziedziczącej po grafie (klasa *GraphImage*), w zamierzeniu miał on otrzymywać jeszcze informację, który wierzchołek ma być źródłem, a który ujściem.

```
explicit FlowNetwork(GraphConfig * config, int source, int target);
```

Jednak zawierał on nadmiarowe informacje w stosunku do konstruktora reprezentacji grafu.

```
explicit GraphImage(GraphConfig * config);
```

Takie podejście uniemożliwiało utworzenie obiektu sieci przepływowej w ten sam sposób, co grafu, i należało w każdej metodzie, która sieć tworzyła, przekazywać owe dwa dodatkowe parametry. Co więcej, z czasem informacja o źródle i ujściu okazywała się zbędna. Każdy graf tworzony od nowa jest pusty i dopiero użytkownik aplikacji, w czasie budowy sieci, decyduje, który wierzchołek ma być źródłem, a który ujściem. Dwa dodatkowe parametry w konstruktorze zostały zastąpione metodami klasy.

7.2.4 Zasada *Interface segregation*

Innym problemem było wyznaczenie poprawnych interfejsów do obsługi algorytmów wyszukiwania maksymalnego przepływu. Sądzono, że dla każdego algorytmu wystarczą trzy abstrakcyjne funkcje: utworzenie sieci residualnej, znalezienie przepływu w tej sieci i zwiększenie przepływu w sieci pierwotnej, które będą wykonywane w pętli, aż do znalezienia maksymalnego przepływu. Algorytm Forda-Fulkersona idealnie wpisywał się w ten schemat, ale algorytmy Dinica i MKM wymagały pewnych zmian. Po pierwsze, potrzebowali warstwowej sieci residualnej, ale tutaj wystarczyło tylko zmienić treść funkcji, a algorytm tworzenia warstwowej sieci wydzielić do wspólnej klasy. Po drugie, wymagały utworzenia przepływu blokującego zamiast ścieżki powiększającej i tu również, z punktu widzenia logiki, wystarczyłoby przeciążenie funkcji do znajdowania przepływu w sieci residualnej. Jednak tworzenie przepływu blokującego jest procesem o wiele bardziej skomplikowanym niż znalezienie ścieżki powiększającej i aby aplikacja mogła spełnić swój walor edukacyjny, on również powinien zostać zilustrowany. Zrodziła się potrzeba, aby algorytmy Dinica i MKM posiadały dwie dodatkowe funkcje: tworzenie przepływu blokującego i zwiększenie przepływu w nim. Działanie algorytmu było przedstawiane w dedykowanym oknie i zależność prezentuje diagram 16. Okno z przepływem blokującym jedynie rozszerza funkcjonalność domyślnego okna dodając do niego podgląd zmian w owym przepływie. Jednak istniejąca do tej pory wersja okna posiadała obiekt

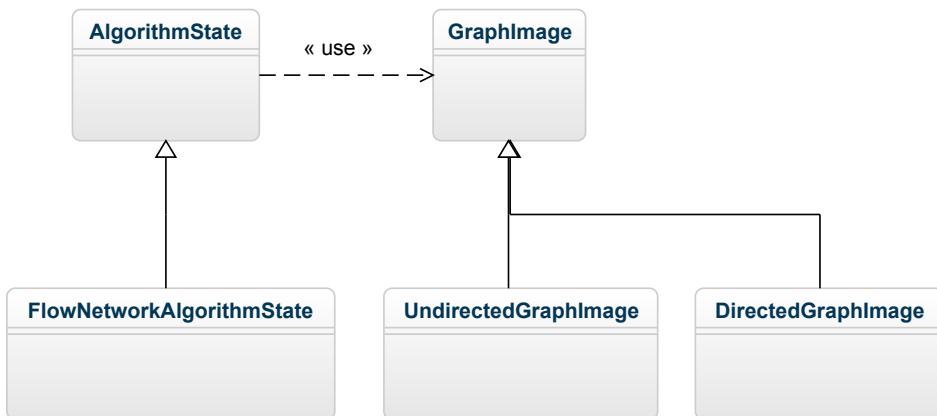


Rysunek 16: Zależność między algorytmem, a oknem

algorytmu z interfejsem zawierającym trzy funkcje. Jeżeli okno potrzebowałoby dostępu do nowych funkcji, wymagane byłoby rzutowanie. Aby tego uniknąć można by stworzyć dodatkowy interfejs, ale zadanie udało się wykonać też na tej strukturze. Tworzenie przepływu blokującego to wielokrotne szukanie ścieżek powiększających w warstwowej sieci residualnej, a zwiększenie przepływu w sieci pierwotnej polega na ich odwzorowaniu. Korzystając z pierwszego modelu można było zrealizować te dwie dodatkowe funkcje realizując już istniejące, wystarczyło jedynie zmieniać argumenty metod lub wywoływać je wielokrotnie. Odpowiadała za to klasa z oknem do przepływu blokującego. Dzięki temu kod stał się trochę mniej elastyczny i rozszerzalny, ale ilość pracy potrzebnej do zrealizowania tych dwóch algorytmów - znacznie mniejsza.

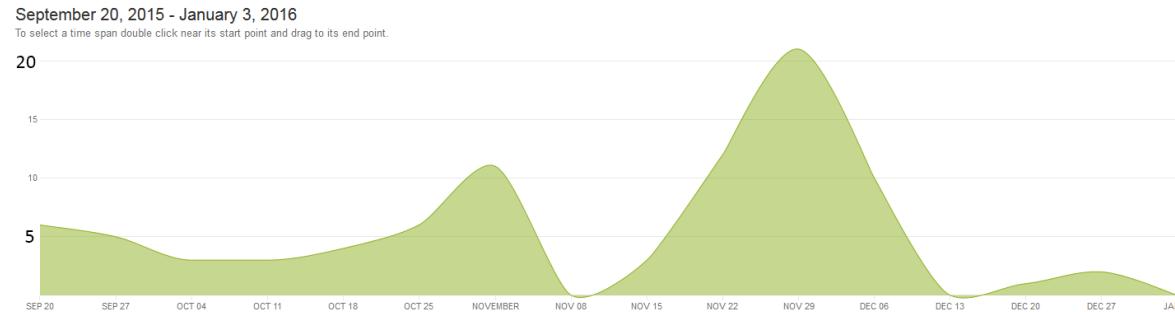
7.2.5 Zasada *Dependency inversion*

Ta zasada nie była trudna do zachowania, chociaż nie była przestrzegana w całej aplikacji. Wszędzie, gdzie to było możliwe, klasy posiadały składowe, a metody argumenty, które były wskaźnikami lub referencjami na jak najogólniejsze struktury. Na diagramie 17 okno algorytmu posiada wskaźnik na abstrakcyjną klasę algorytmu, klasa związana ze stanem algorytmu zwraca wskaźnik na potrzebne okno, bez jawnego przekazywania informacji, czy to okno z przepływem blokującym lub nie, itp. Jeżeli zdarzały się klasy pochodne jako składowe lub argumenty, to dlatego, że były naprawdę wymagane, np. sieć przepływową (klasa `FlowNetwork`) dla algorytmów wyszukiwania maksymalnego przepływu lub tworzenia sieci residualnej.

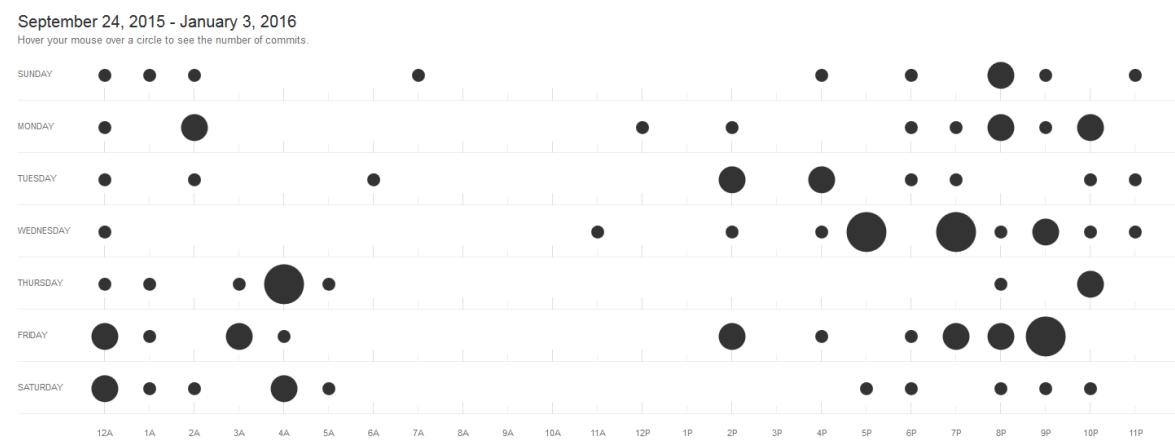
Rysunek 17: Przykład zastosowania zasady *Dependency Inversion*

7.3 Rozwój aplikacji

Jak napisano w rozdziale 2.3.4 cały projekt z pracą inżynierską był założony na repozytorium kodu w serwisie *Bitbucket*. Korzystając z wtyczki *Awesome Graphs for Bitbucket Server* zostały utworzone grafy prezentujące postęp pracy inżynierskiej w postaci liczby zatwierdzonych zmian (ang. *commits*) każdego dnia (rys. 18 i rys. 19).



Rysunek 18: Wygładzony wykres przedstawiający liczbę zmian w każdym tygodniu



Rysunek 19: Zobrazowanie liczby zmian każdego dnia w postaci karty dziurkowanej

Rozdział 8

Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było zrealizowanie wizualizacji działań na abstrakcyjnym modelu danych jakim są sieci przepływowe. Skupiono się na prezentacji algorytmów rozwiązuujących problem wyszukiwania maksymalnego przepływu, jednak nie jest to jedyna rodzina algorytmów jaką można realizować dzięki temu modelowi. Sieci przepływowe są skomplikowaną strukturą danych, o wiele bardziej złożoną niż zwykłe grafy. Problem maksymalnego przepływu jest najbardziej praktycznym i intuicyjnym jaki można rozwiązać dzięki sieci przepływowej, dlatego jest szeroko opisywany w literaturze. Mimo to, wymaga wielu dodatkowych obliczeń i tworzenia struktur pośrednich, co nie jest wymagane w klasycznych algorytmach operujących na prostych grafach, m.in. znajdowaniu najkrótszej ścieżki między wierzchołkami.

Okazało się niemożliwym opisanej całej funkcjonalności oraz szczegółów implementacji jaką posiada aplikacja (m.in. sposobu łączenia rysunków wierzchołków i łuków w jedną całość), więc w specyfikacji wewnętrznej skupiono się na opisaniu najistotniejszych elementów oprogramowania, które były bezpośrednio związane z tematem pracy inżynierskiej, m.in. reprezentacji sieci w pamięci komputera, zapewnieniu jej zgodności z teorią oraz sposobach realizacji algorytmów na niej. Ponadto przedstawiono zastosowane wzorce projektowe oraz możliwości rozszerzania aplikacji, pomijając elementy związane z platformą Qt i implementacją okna aplikacji.

Praca inżynierska była największym projektem programistycznym w trakcie studiów. Wymagała całego zakresu wiedzy, jaki pojawił się na programowaniu komputerów i inżynierii oprogramowania, a także wiele dodatkowego samokształcenia. Największym wyzwaniem było poprawne zaprojektowanie architektury aplikacji, która decydowała o całym późniejszym kierunku rozwoju. Innym kształcącym problemem było przeniesienie abstrakcyjnej struktury danych do pamięci komputera zgodnie z teorią zawartą w literaturze. Wyzwaniem było także zachowanie dobrych praktyk programistycznych. Zdarzały się problemy, które zostały rozwiązane w nieelegancki sposób, a później powróciły w trakcie pisania kolejnych funkcjonalności. Dzięki temu wyciągnięto wiele wiedzy i doświadczenia jakie płyną z pracy nad dużym projektem.

Aplikacja spełnia wszystkie założenia i wymagania jakie były podane w temacie pracy inżynierskiej. Wykonano także dużo dodatkowej funkcjonalności z myślą o wygodzie użytkownika i wiedzy, jaką powinien wynieść korzystając z tego programu. Aplikacja może być bez problemów wykorzystywana jako pomoc dydaktyczna w trakcie zajęć z algorytmiki. Wszystkie przedstawione algorytmy wyznaczania maksymalnego przepływu wykonuje poprawnie, prezentuje w jaki sposób są wykonywane krok po kroku i ilustruje wszystkie operacje. Dzięki niej studentowi, który musi przyswoić sieci przepływowe, na pewno uda się to łatwiej i szybciej. Aplikacja jest bezpieczna, nie wykonuje algorytmów na złe zbudowanych sieciach i informuje użytkownika co należy poprawić, co również jest praktyczną pomocą przy nauce tych struktur danych. Na rynku nie ma wiele gotowych aplikacji edukacyjnych, ani nawet zaawansowanych bibliotek dedykowanych grafom, więc utworzony program stanowi świetne rozwiązanie dla każdego, kto chciałby nauczyć się więcej o sieciach przepływowych. Dzięki zastosowanym wzorcom projektowym oraz hierarchii klas aplikację można rozwijać dalej, wzbogacając ją w przyszłości o operowanie na większej liczbie rodzajów grafów i kolejnych rodzinach algorytmów.

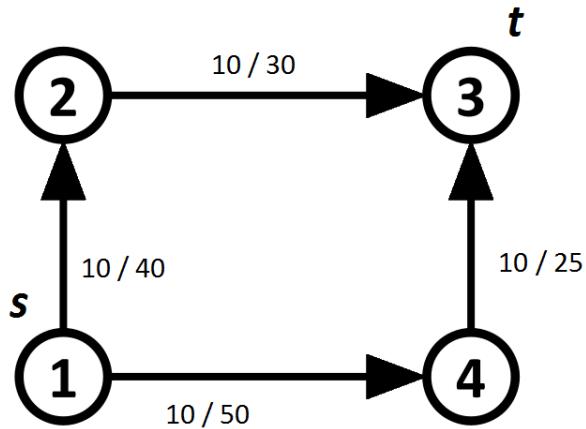
Bibliografia

- [Agn12] Agnieszka Debudaj-Grabysz, Sebastian Deorowicz, Jacek Widuch. *Algorytmy i struktury danych. Wybór zaawansowanych metod.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [And11] Andrei Alexandrescu. *Nowoczesne projektowanie w C++.* Uogólnione implementacje wzorców projektowych. Wydawnictwo HELION, 2011.
- [Eri10] Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, John Vlissides. *Wzorce projektowe. Elementy oprogramowania wielokrotnego użytku.* Wydawnictwo HELION, 2010.
- [Rob05] Robert C. Martin. *The Principles of OOD.* [dostęp: 2015-01-03]. maj 2005. URL: <http://butunclebob.com/ArticleS.UncleBob.PrinciplesOfOOD>.
- [Rob10] Robert C. Martin. *Czysty kod. Podręcznik dobrego programisty.* Wydawnictwo HELION, 2010.
- [Tho09] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. *Introduction to Algorithms.* Third. The MIT Press, 2009.
- [Zbi10] Zbigniew J. Czech, Sebastian Deorowicz, Piotr Fabian. *Algorytmy i struktury danych. Wybrane zagadnienia.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.

Załączniki

Dodatek A

Przykład serializacji



```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <Graph type="flow_network" source="1" target="3" weighted="true">
3   <Config>
4     <Name>Graf 2</Name>
5     <VertexContext type="normal" size="59" strokeSize="12">
6       <Color type="color" r="255" g="255" b="255"/>
7       <Color type="strokeColor" r="0" g="0" b="0"/>
8       <Font bold="true" size="60" family="Calibri"/>
9     </VertexContext>
10    <VertexContext type="selected" size="59" strokeSize="12">
11      <Color type="color" r="0" g="0" b="255"/>
12      <Color type="strokeColor" r="0" g="0" b="80"/>
13      <Font bold="true" size="60" family="Calibri"/>
14    </VertexContext>
15    <EdgeContext type="normal" size="10">
16      <Color type="color" r="0" g="0" b="0"/>
17    </EdgeContext>
18    <EdgeContext type="selected" size="15">
19      <Color type="color" r="255" g="0" b="0"/>
20    </EdgeContext>
21  </Config>
```

```

22 <Model>
23   <Vertex id="1">
24     <Position x="-244.531250" y="72.376556"/>
25     <Point id="1" x="-185" y="72"/>
26     <Point id="2" x="-244" y="13"/>
27     <Point id="6" x="-244" y="131"/>
28   </Vertex>
29   <Vertex id="2">
30     <Position x="-244.531250" y="-302.734344"/>
31     <Point id="2" x="-244" y="-243"/>
32     <Point id="3" x="-185" y="-302"/>
33     <Point id="4" x="-185" y="-302"/>
34   </Vertex>
35   <Vertex id="3">
36     <Position x="298.898376" y="-302.734344"/>
37     <Point id="3" x="298" y="-243"/>
38     <Point id="4" x="239" y="-302"/>
39   </Vertex>
40   <Vertex id="4">
41     <Position x="298.898376" y="72.376556"/>
42     <Point id="1" x="239" y="72"/>
43     <Point id="3" x="298" y="13"/>
44     <Point id="4" x="298" y="13"/>
45     <Point id="8" x="298" y="131"/>
46     <Point id="10" x="293" y="13"/>
47   </Vertex>
48   <Edge type="straight" id="2" vertexFrom="1" vertexTo="2" capacity=
49     "40" flow="10" offsetType="false" offsetValue="0.000000">
50     <Position x="-244.531250" y="13.376556"/>
51     <EdgeTextItem>
52       <Position x="20.013672" y="-115.109367"/>
53     </EdgeTextItem>
54   </Edge>
55   <Edge type="straight" id="1" vertexFrom="1" vertexTo="4" capacity=
56     "50" flow="10" offsetType="false" offsetValue="0.000000">
57     <Position x="-185.531250" y="72.376556"/>
58     <EdgeTextItem>
59       <Position x="72.968758" y="20.110939"/>
60     </EdgeTextItem>
61   </Edge>
62   <Edge type="straight" id="4" vertexFrom="2" vertexTo="3" capacity=
63     "30" flow="10" offsetType="false" offsetValue="0.000000">
64     <Position x="-185.531250" y="-302.734344"/>
65     <EdgeTextItem>
66       <Position x="134.121063" y="-70.312492"/>
67     </EdgeTextItem>
68   </Edge>
69   <Edge type="straight" id="3" vertexFrom="4" vertexTo="3" capacity=
70     "25" flow="10" offsetType="false" offsetValue="0.000000">
71     <Position x="298.898376" y="13.376556"/>
72     <EdgeTextItem>
73       <Position x="33.179668" y="-123.274200"/>
74     </EdgeTextItem>
75   </Edge>
76 </Model>
77 </Graph>

```

Dodatek B

Tworzenie sieci residualnej

```
1 int FlowNetworkAlgorithm::makeResidualNetwork(FlowNetwork * network, FlowNetwork *&
2     ↵  outResidaulNetwork)
3 {
4     // usunięcie starych krawędzi
5     auto oldEdges = outResidaulNetwork->getEdges();
6     for (auto it = oldEdges.begin(); it != oldEdges.end(); ++it)
7     {
8         outResidaulNetwork->removeEdge(*it);
9     }
10    // analiza krawędzi i utworzenie sieci residualnej
11    auto edges = network->getEdges();
12    QList<EdgeImage*> visitedNeighbours;
13    EdgeImage *neighbor;
14    for (EdgeImage * edge : edges)
15    {
16        int capacity = edge->getCapacity();
17        int flow = edge->getFlow();
18        int vertexFromId = edge->VertexFrom()->getId();
19        int vertexToId = edge->VertexTo()->getId();
20        int residualCapacity = capacity - flow;
21        if (edge->hasNeighbor() && !visitedNeighbours.contains(neighbor =
22            ↵  network->edgeAt(vertexToId, vertexFromId)))
23        {
24            visitedNeighbours.push_back(neighbor);
25            visitedNeighbours.push_back(edge);
26            int neighborFlow = neighbor->getFlow();
27            int neighborCapacity = neighbor->getCapacity();
28            residualCapacity = capacity - flow + neighborFlow;
29            int neighborResidualCapacity = neighborCapacity - neighborFlow + flow;
30            if (residualCapacity != 0)
31                outResidaulNetwork->addEdge(vertexFromId, vertexToId, residualCapacity);
32            if (neighborResidualCapacity != 0)
33                outResidaulNetwork->addEdge(vertexToId, vertexFromId, neighborResidualCapacity);
34        }
35        else
36        {
37            if (flow != 0)
38                outResidaulNetwork->addEdge(vertexToId, vertexFromId, flow);
39            if (residualCapacity != 0)
40                outResidaulNetwork->addEdge(vertexFromId, vertexToId, residualCapacity);
41        }
42    }
43    return 0;
44 }
```

Dodatek C

Szukanie ścieżki w sieci

```
1  QList<EdgeImage*> FlowNetworkAlgorithm::findPathBetween(FlowNetwork * network, VertexImage *
2   ←   from, VertexImage * to)
3 {
4     QList<EdgeImage*> path;
5     VertexImage * source = network->getSource();
6     EdgeImageMap edges = network->getEdges();
7     bool finished = false;
8     VertexImage * currentVertex = from;
9     QList<VertexImage*> visitedVertices;
10    QList<VertexImage*> rejectedVertices;
11    EdgeImage * lastEdge = nullptr;
12    srand(time(NULL));
13    while (!finished)
14    {
15        QList<EdgeImage*> possibleEdges;
16        for (auto edge : edges)
17        {
18            addEdgeToPath(possibleEdges, edge, currentVertex, source, visitedVertices,
19   ←   rejectedVertices);
20        }
21        if (possibleEdges.empty())
22        {
23            if (lastEdge == nullptr)
24            {
25                finished = true;
26                return path;
27            }
28            else
29            {
30                rejectedVertices.push_back(currentVertex);
31                path.pop_back();
32                if (!path.empty())
33                {
34                    lastEdge = path.last();
35                    currentVertex = lastEdge->VertexTo();
36                }
37                else
38                {
39                    lastEdge = nullptr;
40                    currentVertex = from;
41                }
42                continue;
43            }
44        }
45        EdgeImage * chosenEdge = possibleEdges.at(rand() % possibleEdges.size());
```

```
44     VertexImage * nextVertex = chosenEdge->VertexTo();
45     visitedVertices.push_back(nextVertex);
46     path.push_back(chosenEdge);
47     currentVertex = nextVertex;
48     lastEdge = chosenEdge;
49     if (currentVertex == to)
50         finished = true;
51 }
52 return path;
53 }

54

55 void FordFulkersonAlgorithm::addEdgeToPath(QList<EdgeImage*> & possibleEdges, EdgeImage * edge,
56     ~ VertexImage * currentVertex, VertexImage * source, QList<VertexImage*> const &
57     ~ visitedVertices, QList<VertexImage*> const & rejectedVertices)
58 {
59     if (edge->VertexFrom() == currentVertex &&
60         edge->VertexTo() != source &&
61         !visitedVertices.contains(edge->VertexTo()) &&
62         !rejectedVertices.contains(edge->VertexTo()))
63     {
64         possibleEdges.push_back(edge);
65     }
66 }
```

Dodatek D

Zwiększenie przepływu w sieci

```
1 void FlowNetworkAlgorithm::increaseFlow(FlowNetwork * & network, QList<EdgeImage*> const & path,
2                                     int increase)
3 {
4     int oldFlow;
5     EdgeImage * networkEdge;
6     for (EdgeImage * edge : path)
7     {
8         int vertexFromId = edge->VertexFrom()->getId();
9         int vertexToId = edge->VertexTo()->getId();
10        networkEdge = network->edgeAt(vertexFromId, vertexToId);
11        // jeżeli krawędź nie istnieje w prawdziwej sieci, należy utworzyć przepływ zwrotny
12        if (networkEdge == nullptr)
13        {
14            networkEdge = network->edgeAt(vertexToId, vertexFromId);
15            oldFlow = networkEdge->getFlow();
16            networkEdge->setFlow(oldFlow - increase);
17        }
18        // jeżeli krawędź istnieje, ale posiada sąsiada, należy zmniejszyć jego przepływ
19        else if (networkEdge != nullptr && networkEdge->hasNeighbor())
20        {
21            oldFlow = networkEdge->getFlow();
22            EdgeImage * neighbourEdge = network->edgeAt(edge->VertexTo()->getId(),
23                                               edge->VertexFrom()->getId());
24            int currentNeighborFlow = neighbourEdge->getFlow();
25            networkEdge->setFlow(std::max(increase - currentNeighborFlow, 0));
26            neighbourEdge->setFlow(std::max(currentNeighborFlow - increase, 0));
27        }
28        // istnieje, ale nie posiada sąsiada, zwykłe zwiększenie
29        else
30        {
31            oldFlow = networkEdge->getFlow();
32            networkEdge->setFlow(oldFlow + increase);
33        }
34        edge->setSelected(false);
35        networkEdge->setSelected(true);
    }
}
```

Dodatek E

Warunki stopu

```
1 bool FlowNetworkAlgorithm::checkExistingPathsFromSource(FlowNetwork * network)
2 {
3     VertexImage * source = network->getSource();
4     bool pathExists = false;
5     for (auto networkEdge : network->getEdges())
6     {
7         if (networkEdge->VertexFrom() == source)
8             if (networkEdge->getFlow() == networkEdge->getCapacity())
9                 continue;
10        else
11        {
12            pathExists = true;
13            break;
14        }
15    }
16    return pathExists;
17 }
```

```
1 bool FlowNetworkAlgorithm::checkExistingPathsToTarget(FlowNetwork * network)
2 {
3     VertexImage * target = network->getTarget();
4     bool pathExists = false;
5     for (auto networkEdge : network->getEdges())
6     {
7         if (networkEdge->VertexTo() == target)
8         {
9             if (networkEdge->getFlow() == networkEdge->getCapacity())
10                 continue;
11             else
12             {
13                 pathExists = true;
14                 break;
15             }
16         }
17     }
18     return pathExists;
19 }
```

```
1 QList<EdgeImage*> FlowNetworkAlgorithm::findAugumentingPath(FlowNetwork * network, int &
2   capacity)
3 {
4     VertexImage * source = network->getSource();
5     VertexImage * target = network->getTarget();
6     QList<EdgeImage*> augmentingPath = augmentingPath = findPathBetween(network, source,
7       target);
8     if (augumentingPath.size() == 0)
9       capacity = 0;
10    else
11    {
12      auto it = std::min_element(augumentingPath.begin(), augmentingPath.end(), [&](EdgeImage
13        * edge1, EdgeImage * edge2)
14      {
15        return edge1->getCapacity() < edge2->getCapacity();
16      });
17      _currentMaxFlow += (capacity = (*it)->getCapacity());
18    }
19    return augmentingPath;
20 }
```

Dodatek F

Klasa algorytmu Forda-Fulkersona

```
1 class FordFulkersonAlgorithm : public FlowNetworkAlgorithm
2 {
3     public:
4         int makeResidualNetwork(FlowNetwork * network, FlowNetwork *& outResidualNetwork) override;
5         QList<EdgeImage*> findAugmentingPath(FlowNetwork * residualNetwork, int & capacity)
6             override;
7         void increaseFlow(FlowNetwork *& network, QList<EdgeImage*> const & path, int increase)
8             override;
9     };
10
11     int FordFulkersonAlgorithm::makeResidualNetwork(FlowNetwork * network, FlowNetwork *&
12         residualNetwork)
13     {
14         return FlowNetworkAlgorithm::makeResidualNetwork(network, residualNetwork);
15     }
16
17     QList<EdgeImage*> FordFulkersonAlgorithm::findAugmentingPath(FlowNetwork * residualNetwork, int
18         & capacity)
19     {
20         return FlowNetworkAlgorithm::findAugmentingPath(residualNetwork, capacity);
21     }
22
23     void FordFulkersonAlgorithm::increaseFlow(FlowNetwork *& network, QList<EdgeImage*> const &
24         path, int increase)
25     {
26         FlowNetworkAlgorithm::increaseFlow(network, path, increase);
27     }
```

Dodatek G

Realizacja algorytmu Floyda-Warshalla

```
1  /// <summary>
2  /// Tworzy macierz najkrótszych dróg z każdego wierzchołka do innych.
3  /// Długości dróg obliczane są algorymem Floyda-Warshalla.
4  /// Ponieważ krawędzi w sieci przepływowej posiadają przepustowość i przepływ,
5  /// zakłada się, że każda droga między sąsiednimi wierzchołkami jest równa 1.
6  /// </summary>
7  /// <param name="newtork">Sieć przepływową.</param>
8  void BlockingFlowAlgorithm::createShortestPathsMatrix(FlowNetwork *& newtork)
9  {
10     const int n = newtork->getHighestVertexId();
11     _pathMatrix = FloatMatrix(n);
12     for (int i = 0; i < n; ++i)
13     {
14         _pathMatrix[i].resize(n);
15     }
16     for (int i = 0; i < n; ++i)
17     {
18         for (int j = 0; j < n; ++j)
19         {
20             if (i != j)
21                 _pathMatrix[i][j] = std::numeric_limits<float>::infinity();
22         }
23     }
24     for (auto coord : newtork->getEdges().keys())
25     {
26         _pathMatrix[coord.first - 1][coord.second - 1] = 1.0f;
27     }
28     for (int k = 0; k < n; ++k)
29     {
30         for (int i = 0; i < n; ++i)
31         {
32             if (_pathMatrix[i][k] != std::numeric_limits<float>::infinity())
33             {
34                 for (int j = 0; j < n; ++j)
35                 {
36                     float first = _pathMatrix[i][j];
37                     float second = _pathMatrix[i][k] + _pathMatrix[k][j];
38                     _pathMatrix[i][j] = std::min(first, second);
39                 }
40             }
41         }
42     }
43 }
```

Dodatek H

Usuwanie elementów nadmiarowych z sieci residualnej

```
1  /// <summary>
2  /// Usuwa wszystkie nadmiarowe elementy grafu, które nie pojawią się w przepływie blokującym.
3  /// </summary>
4  /// <param name="residualNewtork">Sieć przepływowa.</param>
5  /// <returns></returns>
6  int BlockingFlowAlgorithm::removeRedundantElements(FlowNetwork *& residualNewtork)
7  {
8      _sourceId = residualNewtork->getSrcId() - 1;
9      _targetId = residualNewtork->getTargetId() - 1;
10     createShortestPathsMatrix(residualNewtork);
11     hideRedundantVertices(residualNewtork);
12     removeRedundantEdges(residualNewtork);
13     float sourceTargetDistance = _pathMatrix[_sourceId][_targetId];
14     return sourceTargetDistance == std::numeric_limits<float>::infinity() ? 0 :
15         sourceTargetDistance;
16 }
```

```
1  /// <summary>
2  /// Ukrywa nadmiarowe wierzchołki, które nie pojawią się w przepływie blokującym.
3  /// Przeszukiwanie przepływu odbywa się wyłącznie poprzez krawędzie, więc wierzchołki
4  /// wystarczy ukryć, nie trzeba ich usuwać.
5  /// Schowane zostają wierzchołki, które spełniają warunek  $v \in V \setminus \{t\} : d_{min}(s, t) \leq d_{min}(s, v)$ 
6  /// </summary>
7  /// <param name="residualNewtork">Sieć przepływowa.</param>
8  void BlockingFlowAlgorithm::hideRedundantVertices(FlowNetwork *& residualNewtork)
9  {
10     for (auto vertex : residualNewtork->getVertices())
11     {
12         int vertexId = vertex->getId() - 1;
13         if (_pathMatrix[_sourceId][_targetId] <= _pathMatrix[_sourceId][vertexId] && vertexId !=
14             _targetId)
15         {
16             _currentHiddenVertices.push_back(vertex);
17             vertex->hide();
18         }
19     }
20 }
```

```

1  /// <summary>
2  /// Usuwa nadmiarowe krawędzie, które nie biorą udziału w tworzeniu przepływu blokującego w
3  /// warstwowej sieci residualnej.
4  /// Usuwane są krawędzie, które spełniają warunek  $(v_j, v_i) \in E : d_{min}(s, v_i) \leq d_{min}(s, v_j)$ 
5  /// </summary>
6  /// <param name="residualNewtork">Sieć przepływowa.</param>
7  void BlockingFlowAlgorithm::removeRedundantEdges(FlowNetwork *& residualNewtork)
{
    QList<EdgeImage*> edgesToRemove;
    for (auto edge : residualNewtork->getEdges())
    {
        int from = edge->VertexFrom()->getId() - 1;
        int to = edge->VertexTo()->getId() - 1;
        int first = _pathMatrix[_sourceId][to];
        int second = _pathMatrix[_sourceId][from];
        if (first <= second)
            edgesToRemove.push_back(edge);
    }
    for (auto edge : edgesToRemove)
    {
        residualNewtork->removeEdge(edge);
    }
    for (auto vertex : _currentHiddenVertices)
    {
        for (auto edge : residualNewtork->getEdges())
        {
            if (edge->VertexFrom() == vertex || edge->VertexTo() == vertex)
            {
                residualNewtork->removeEdge(edge);
            }
        }
    }
}

```

Dodatek I

Zapełnianie przepływu blokującego

```
1  /// <summary>
2  /// Przeszukanie przepływu blokującego w celu znalezienia ścieżki powiększającej.
3  /// Jeżeli isnieje, dodaje ją i przepływ do kontenerów.
4  /// </summary>
5  void BlockingFlowAlgorithmWindow::findAugmentingPathInBlockingFlow()
6  {
7      _currentCapacity = 0;
8      _currentBlockingPath = _algorithm->findAugmentingPath(_blockingFlow, _currentCapacity);
9      if (_currentBlockingPath.size() != 0)
10     {
11         pushBlockingSet(_currentBlockingPath, _currentCapacity);
12     }
13 }
```

```
1  /// <summary>
2  /// Dodanie nowej ścieżki powiększającej do zbioru ścieżek.
3  /// </summary>
4  /// <param name="path">Ścieżka.</param>
5  /// <param name="capacity">Maksymalna wartość przepustowości residualnej.</param>
6  void BlockingFlowAlgorithmWindow::pushBlockingSet(QList<EdgeImage*> const & path, int capacity)
7  {
8      QList<EdgeImage*> residualPath;
9      for (auto edge : path)
10     {
11         int from = edge->VertexFrom()->getId();
12         int to = edge->VertexTo()->getId();
13         residualPath.push_back(_residualNetwork->edgeAt(from, to));
14     }
15     _paths.push_back(residualPath);
16     _capacities.push_back(capacity);
17 }
```

```
1  /// <summary>
2  /// Zwiększa przepływ w sieci przepływającej o dodatkową wartość w znalezionej ścieżce.
3  /// </summary>
4  void FlowNetworkAlgorithmWindow::increaseFlow()
5  {
6      for (int i = 0; i < _capacities.size(); ++i)
7      {
8          _algorithm->increaseFlow(_network, _paths[i], _capacities[i]);
9      }
10     clearSets();
11 }
```

Dodatek J

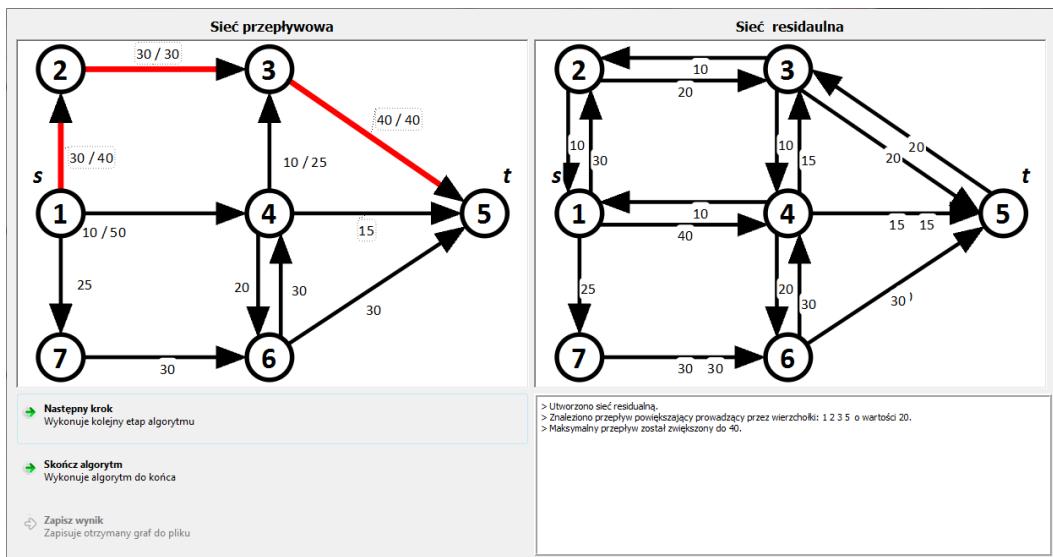
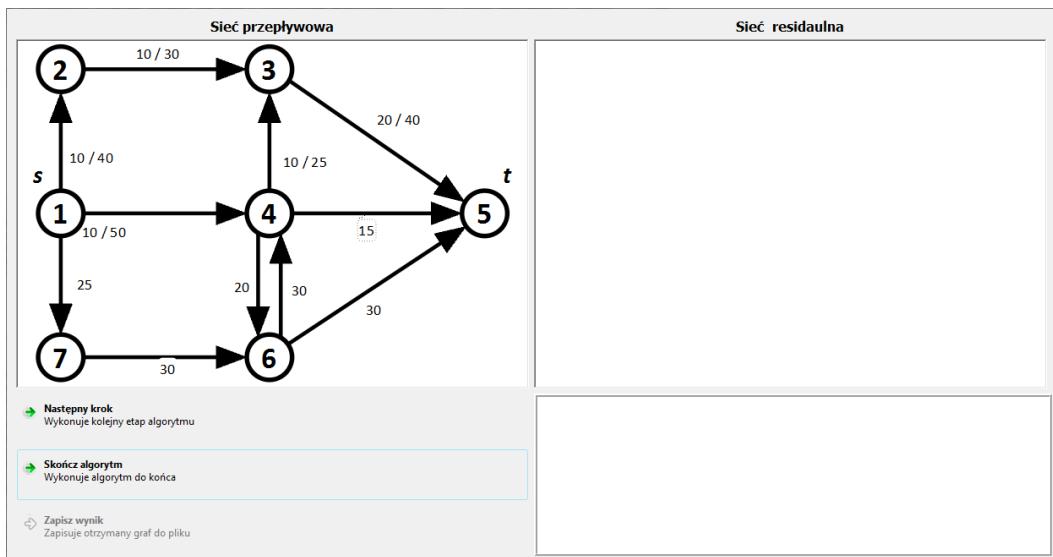
Algorytm MKM

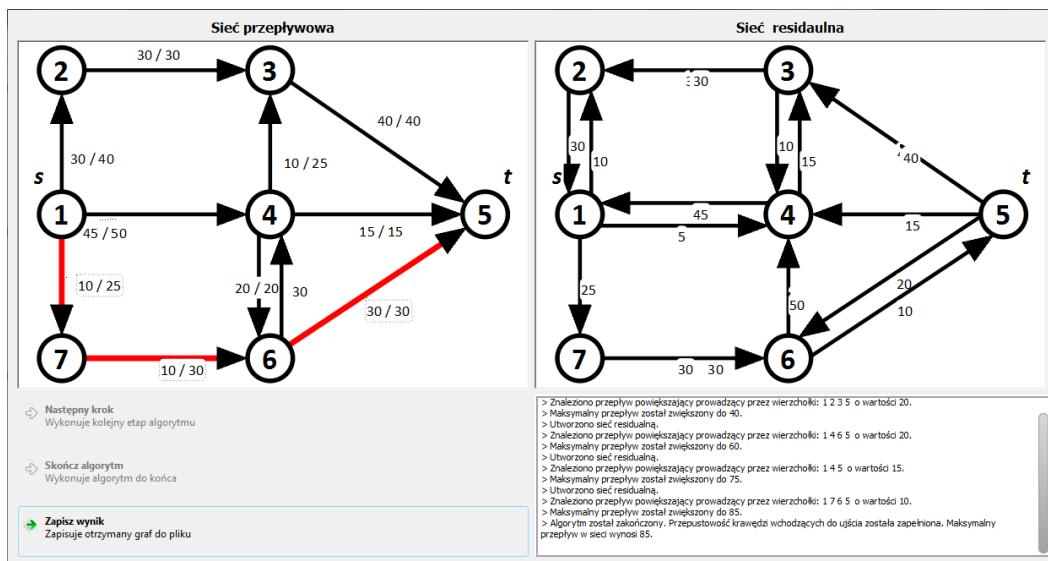
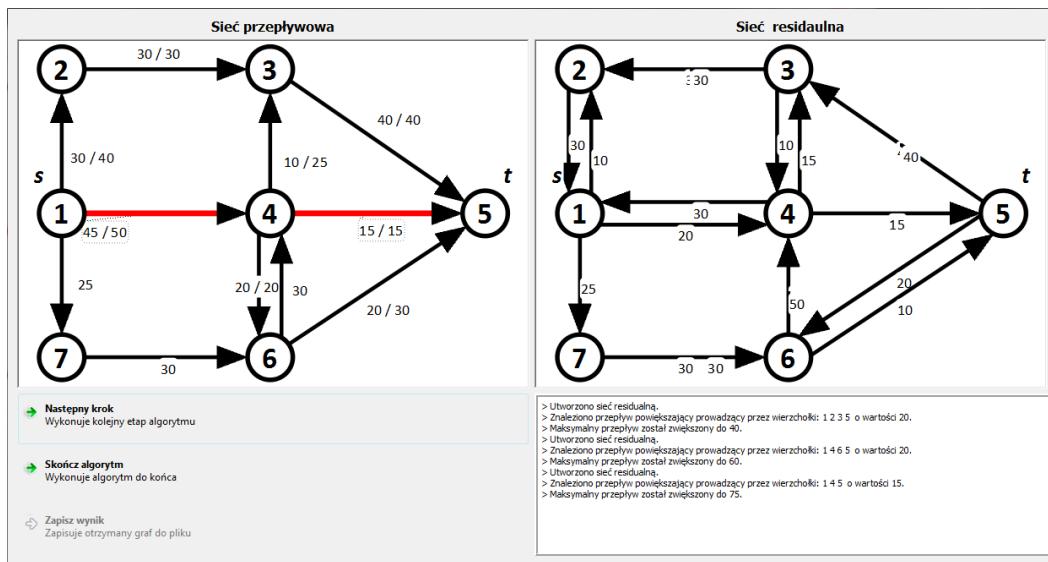
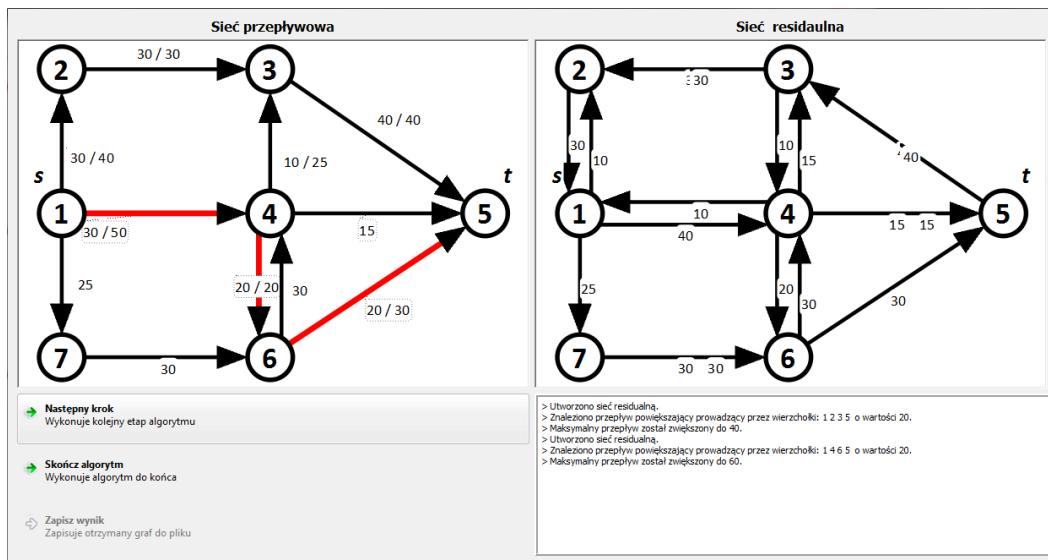
```
1 QList<EdgeImage*> MkmAlgorithm::findAugumentingPath(FlowNetwork * network, int & capacity)
2 {
3     QList<EdgeImage*> pathToTarget, pathToSource;
4     do
5     {
6         pathToTarget.clear();
7         pathToSource.clear();
8         VertexImage * vertex = findVertexWithMinimalPotential(network);
9         if (vertex == nullptr)
10            break;
11         pathToTarget = sendUnitsToTarget(network, vertex->getId());
12         pathToSource = sendUnitsToSource(network, vertex->getId());
13         bool succeeded = pathToSource.size() != 0 && pathToTarget.size() != 0;
14         if (!succeeded)
15             _rejectedVertices.push_back(vertex);
16         else
17         {
18             capacity = std::get<2>(_potentialMap[vertex->getId()]);
19             _currentMaxFlow += capacity;
20             vertex->setSelected(true);
21             network->vertexAt(vertex->getId())->setSelected(true);
22         }
23     } while (pathToSource.size() == 0 || pathToTarget.size() == 0);
24     return pathToSource + pathToTarget;
25 }
```

```
1 VertexImage * MkmAlgorithm::findVertexWithMinimalPotential(FlowNetwork * network)
2 {
3     float minimalPotential = std::numeric_limits<float>::infinity();
4     VertexImage * chosenVertex = nullptr;
5     for (PotentialMap::const_iterator it = _potentialMap.begin(); it != _potentialMap.end();
6          ++it)
6     {
7         float currentPotential = std::get<2>(*it);
8         VertexImage * vertex = network->vertexAt(it.key());
9         if (currentPotential != 0 && vertex->isVisible()
10            && !_rejectedVertices.contains(vertex) && currentPotential < minimalPotential)
11         {
12             chosenVertex = vertex;
13             minimalPotential = currentPotential;
14         }
15     }
16     return chosenVertex;
17 }
```

Dodatek K

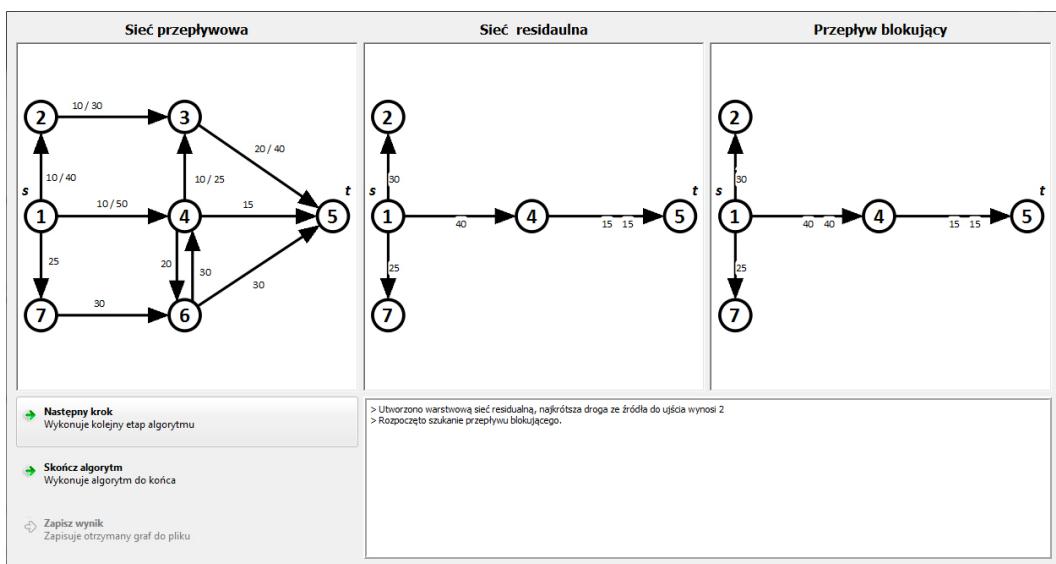
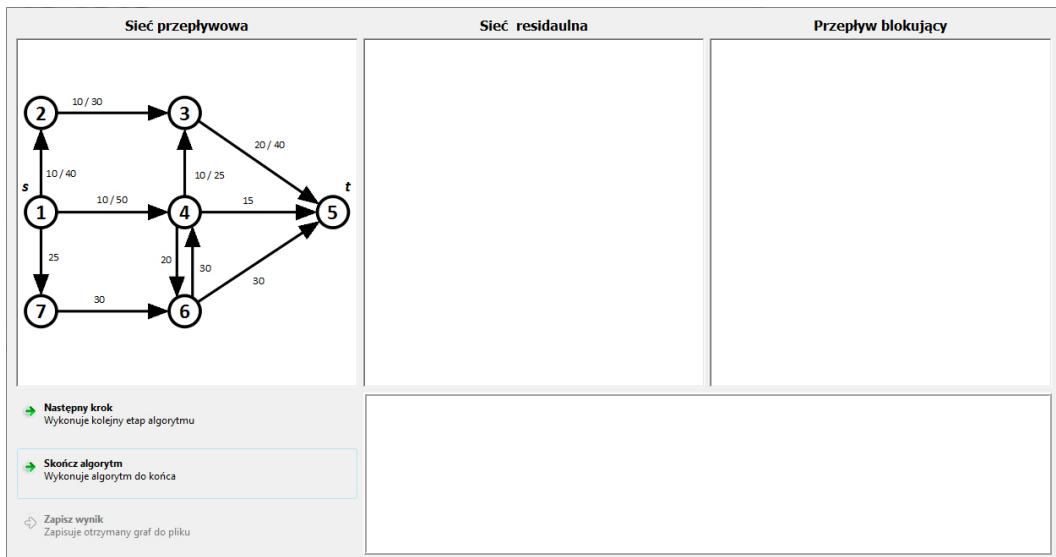
Realizacja algorytmu Forda-Fulkersona

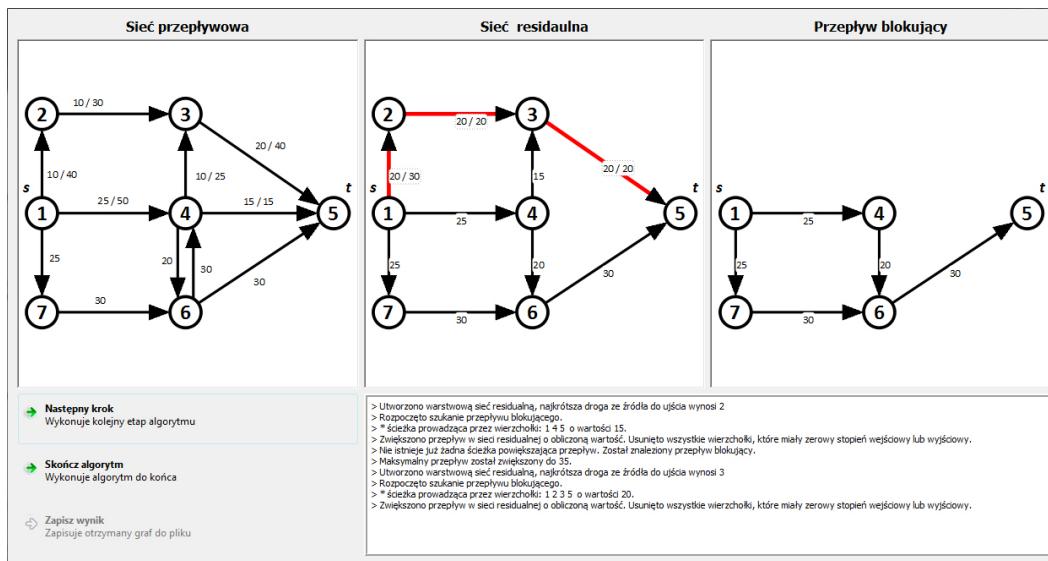
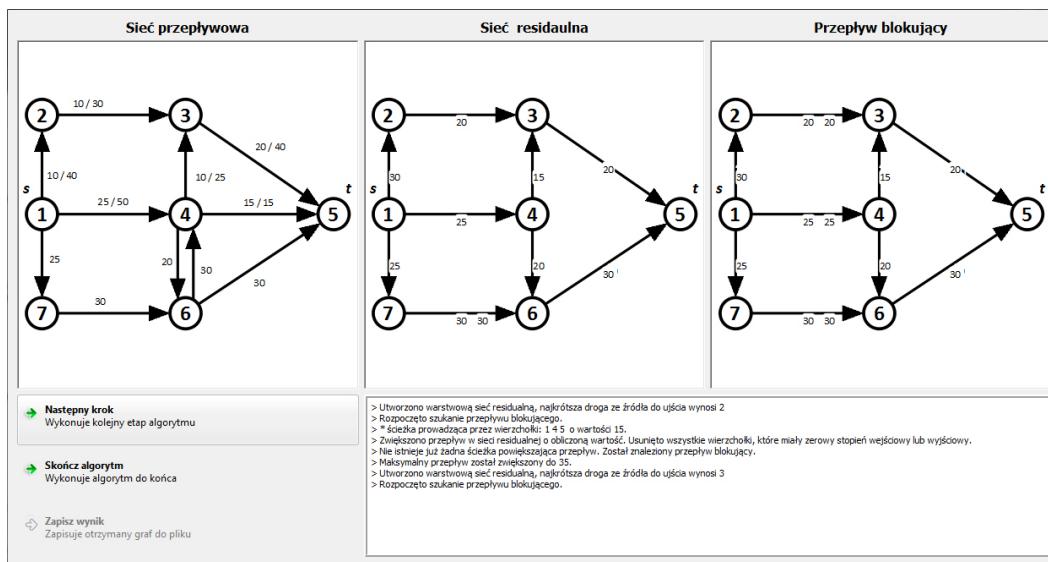
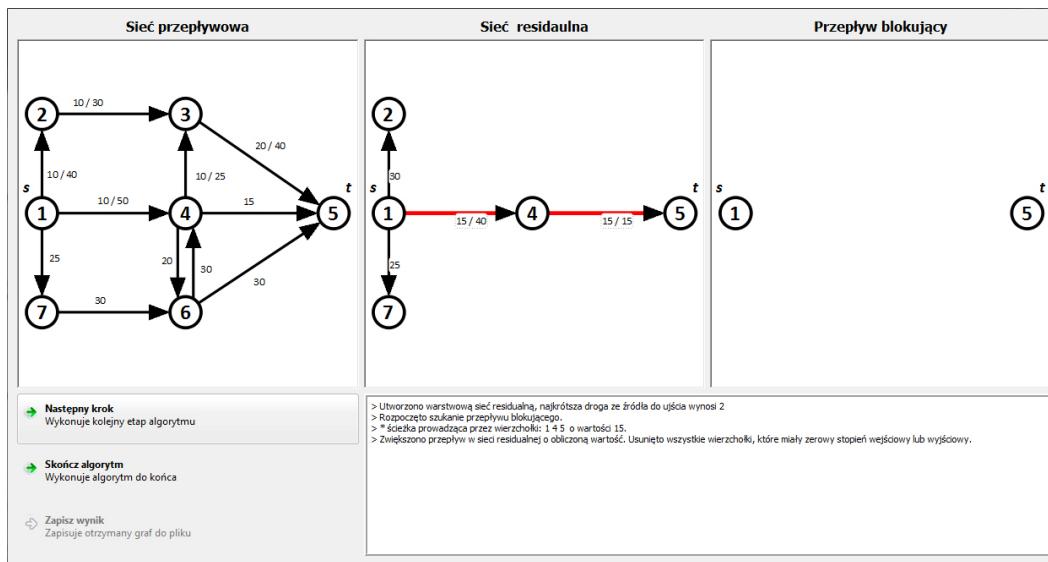


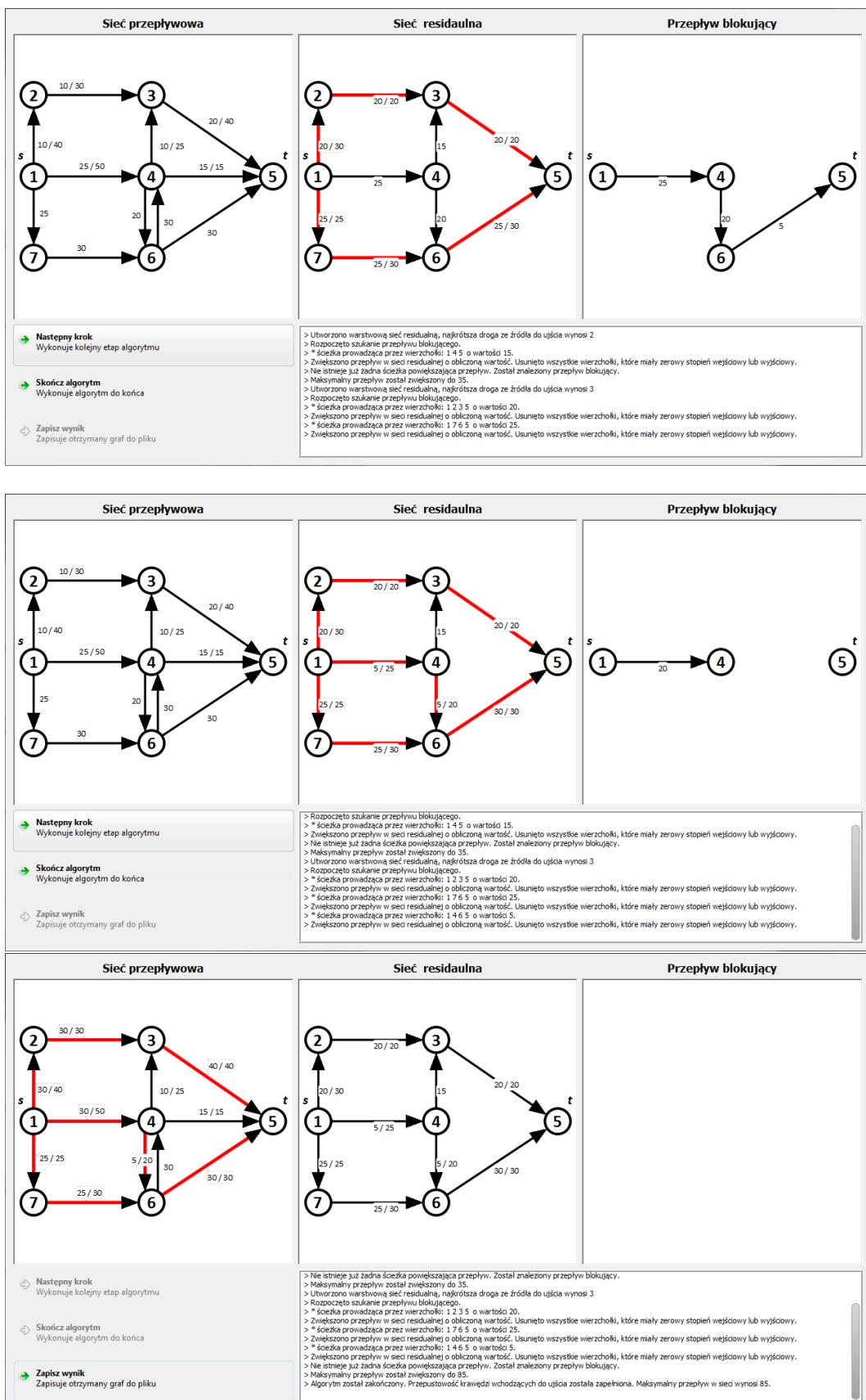


Dodatek L

Realizacja algorytmu Dinica

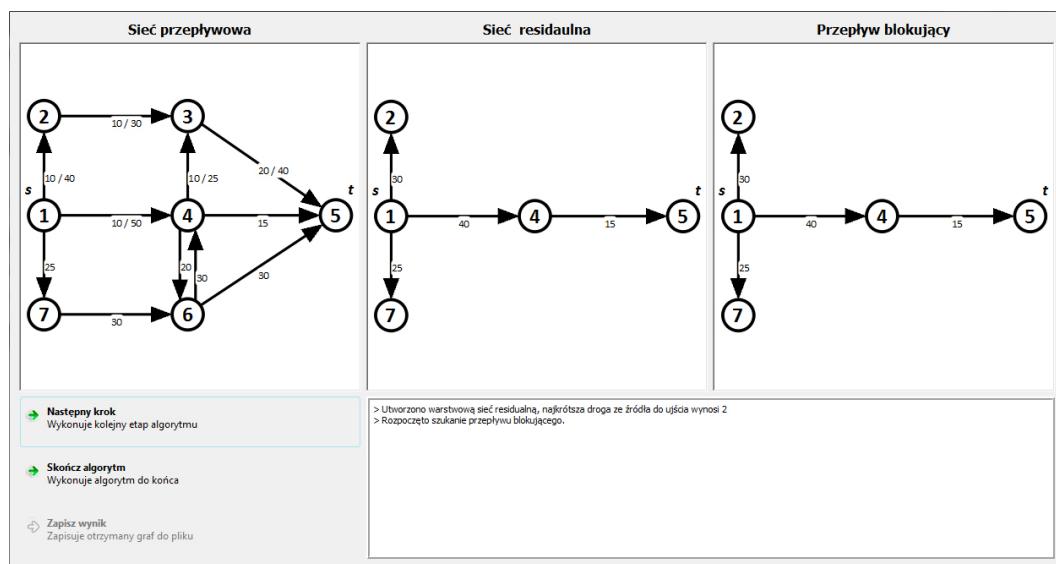
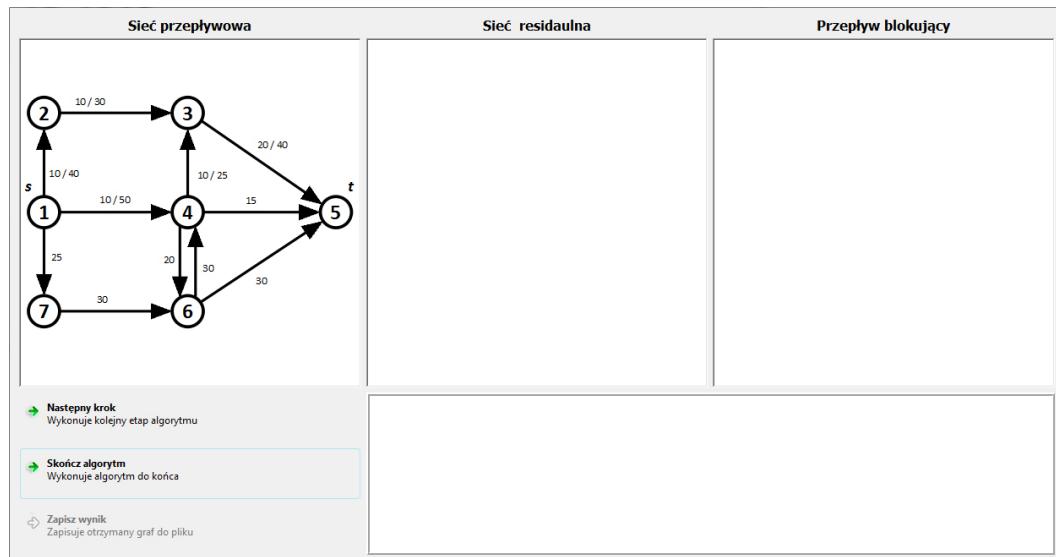


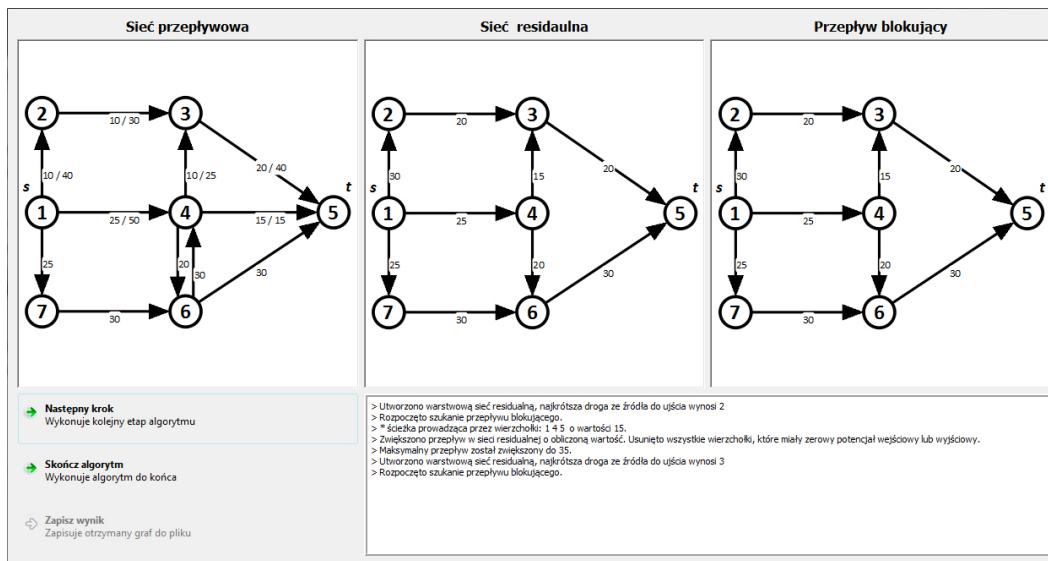
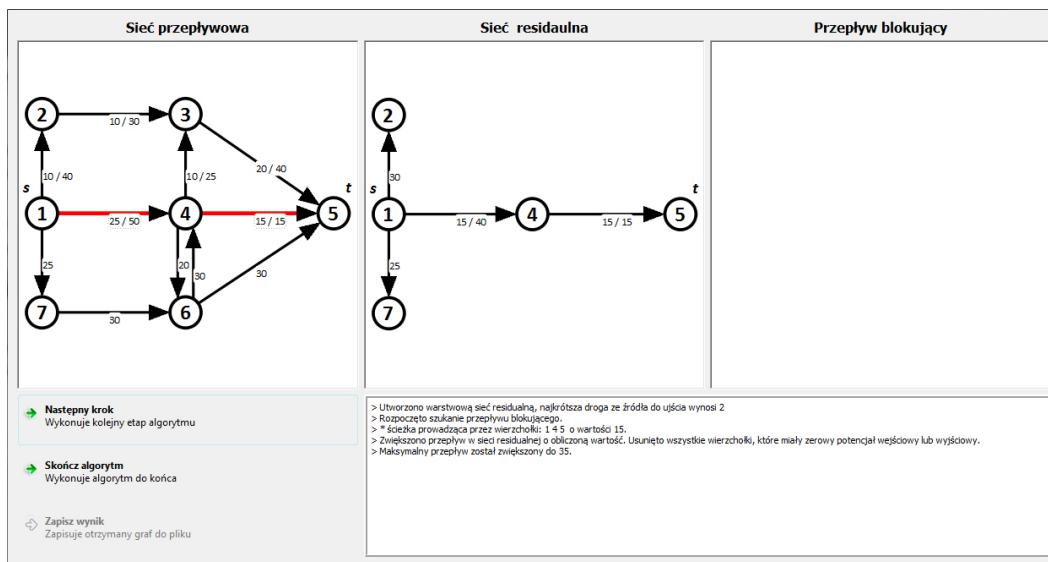
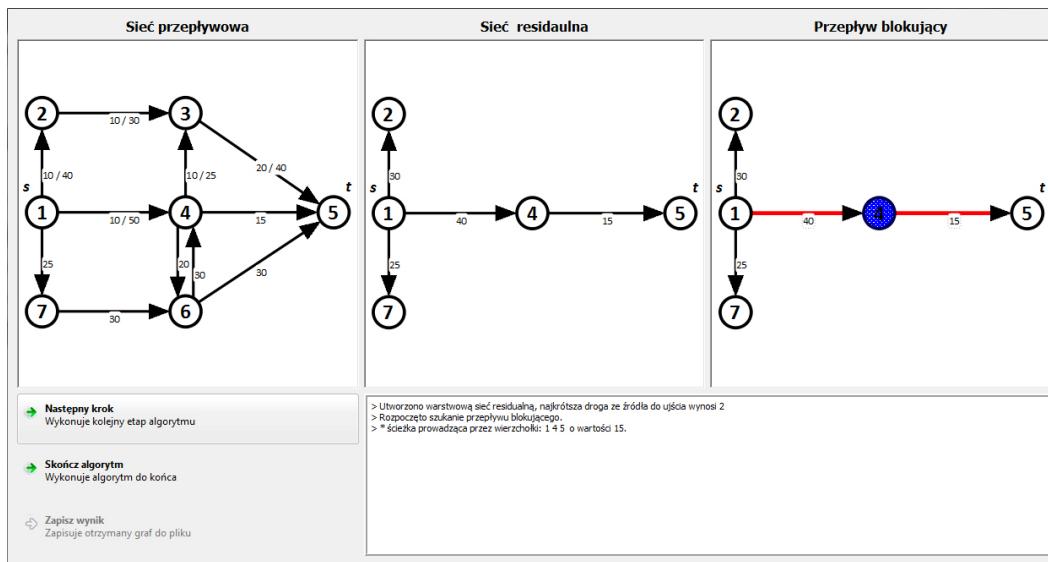


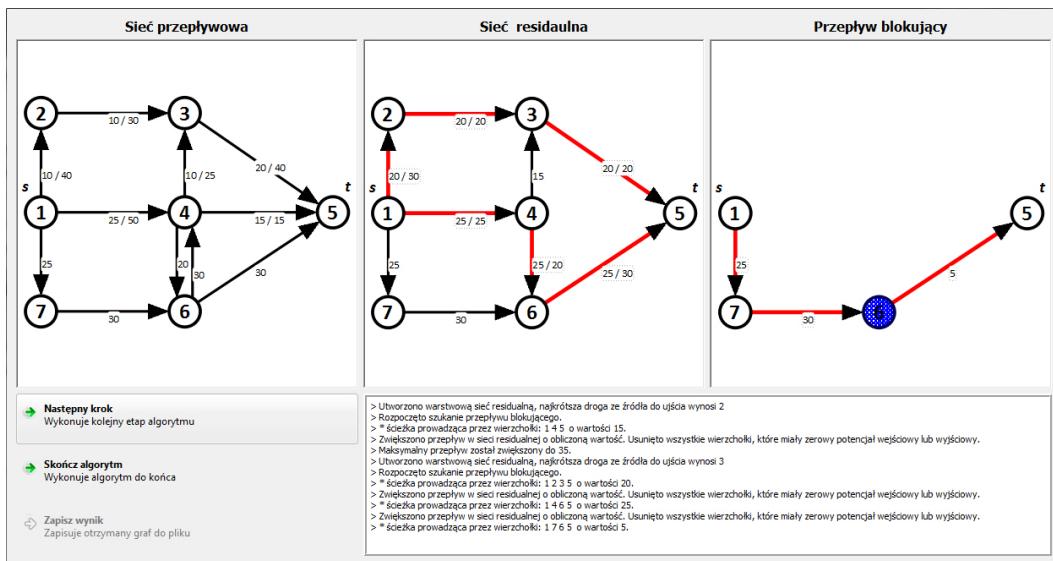
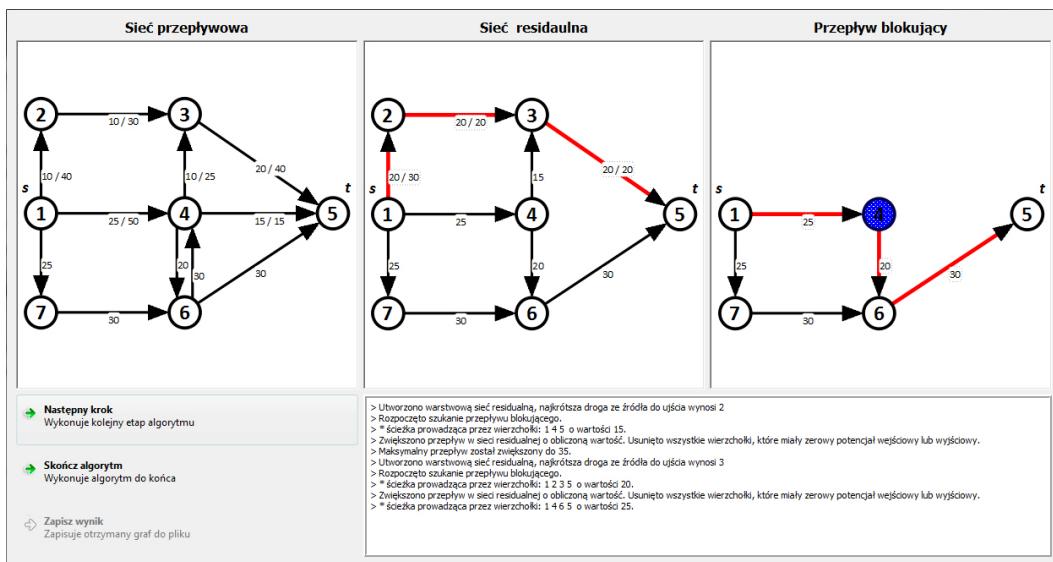
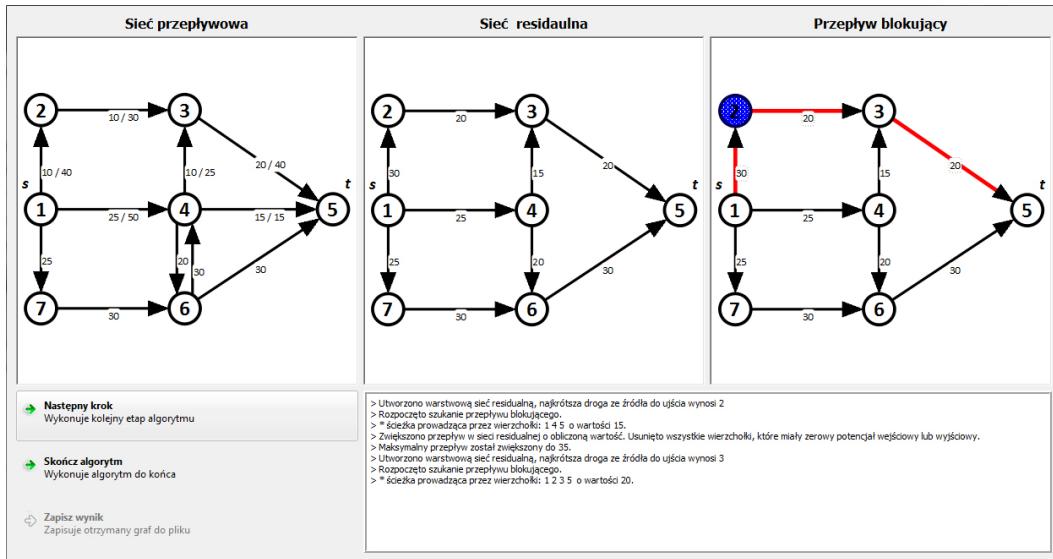


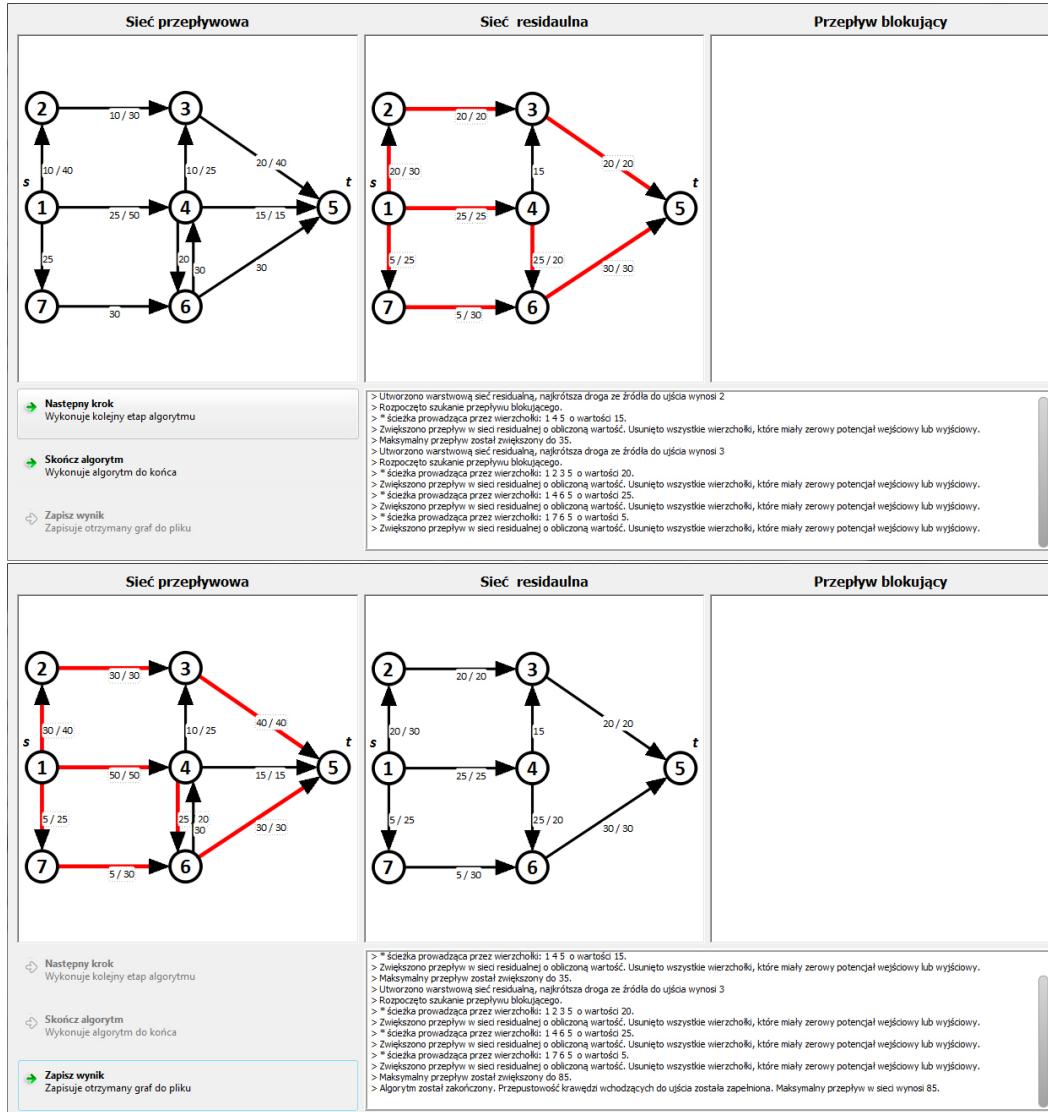
Dodatek M

Realizacja algorytmu MKM









Spis rysunków

1	Zobrazowanie przepływu netto	4
2	Przykładowa sieć przepływowa i utworzona na jej podstawie sieć residualna	4
3	Zobrazowanie różnicy między siecią residualną, a warstwową siecią residualną	5
4	Funkcjonalności wymagane przez potencjalnego użytkownika	9
5	Interfejs graficzny	11
6	Okienko z wyborem nazwy	12
7	Etapy dodawania łuku	12
8	Możliwe zmiany w wyglądzie sieci	13
9	Przedstawienie linii łączącej etykię z łukiem	13
10	Okno ilustrujące przebieg algorytmu Forda-Fulkersona	14
11	Okno po zakończeniu wykonywania algorytmu	15
12	Diagram klas struktury sieci	17
13	Sieć z ograniczeniem przepływu u źródła	26
14	Sieć z ograniczeniem przepływu u ujścia	26
15	Sieć z ograniczeniem przepływu między źródłem, a ujściem	26
16	Zależność między algorytmem, a oknem	29
17	Przykład zastosowania zasady <i>Dependency Inversion</i>	29
18	Wyglądzony wykres przedstawiający liczbę zmian w każdym tygodniu	30
19	Zobrazowanie liczby zmian każdego dnia w postaci karty dziurkowanej	30

Spis tablic

6.1 Wyniki testu dla sieci na rys. 13	26
6.2 Wyniki testu dla sieci na rys. 14	26
6.3 Wyniki testu dla sieci na rys. 15	26

Spis algorytmów

1	Wyznaczenie maksymalnego przepływu algorytmem Forda-Fulkersona	6
2	Wyznaczenie maksymalnego przepływu z wykorzystaniem przepływu blokującego	6
3	Wyznaczenie przepływu blokującego algorytmem Dinica	7
4	Wyznaczenie przepływu blokującego algorytmem MKM	7
5	Tworzenie nowego łuku w sieci residualnej	19
6	Poszukiwanie ścieżki między wierzchołkami	20
7	Zwiększenie przepływu w sieci	21
8	Tworzenie przepływu blokującego algorytmem MKM	23