

PIOTR WIŚNIEWSKI

mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: wpiotr@agh.edu.pl

Projekt i implementacja systemu wspomaganie decyzji dla zarządzania kryzysowego transportem miejskim^{1, 2}

Streszczenie: Miejski transport publiczny narażony jest na wiele czynników wewnętrznych oraz zewnętrznych, które mogą zakłócić jego funkcjonowanie. Sytuacja ta dotyczy szczególnie komunikacji szynowej, która ze względu na konieczność korzystania z rozbudowanej infrastruktury charakteryzuje się mniejszą elastycznością w wyznaczaniu tras. W artykule przedstawiono rozwiązanie wspomagające bieżące zarządzanie komunikacją tramwajową, ze szczególnym uwzględnieniem sytuacji kryzysowych. Prowadzone rozważania obejmują przede wszystkim analizę działania komunikacji miejskiej, dobór odpowiedniej reprezentacji matematycznej wraz z dostosowaniem jej do warunków rzeczywistych, sformułowanie wskaźnika jakości oraz algorytmów poszukiwania rozwiązania, a także utworzenie aplikacji wykorzystującej opisane wcześniej rozwiązania. Zastosowany model formalny sieci oparty został na grafie mieszanym, w którym wierzchołki odpowiadają punktom decyzyjnym, podczas gdy krawędzie reprezentują poszczególne odcinki torów. Ponadto model matematyczny zawiera także wskaźnik jakości wykorzystywany w celu wyznaczenia rekomendowanej trasy alternatywnej oraz zbiór ścieżek zabronionych, które nie mogą zostać wytyczone w rzeczywistych warunkach ze względu na specyfikę układu torowego. Zaprojektowany w ramach prowadzonych prac system wspomaganie decyzji został przewidziany jako narzędzie wsparcia dla osób odpowiedzialnych za bieżące utrzymanie ruchu pojazdów transportu publicznego. Proponowana aplikacja zawiera dane modelu zapisane w zestawie plików źródłowych i umożliwia wykorzystanie jednego z czterech algorytmów, które mogą być użyteczne w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowej.

Słowa kluczowe: transport szynowy, tramwaje, teoria grafów, wspomaganie decyzji.

Wprowadzenie

Natężenie ruchu drogowego w miastach stale się zwiększa. Jednocześnie coraz wyższy jest poziom społecznej troski o środowisko naturalne. Obydwa te czynniki sprawiają, że komunikacja miejska zyskuje na znaczeniu w kontekście życia codziennego. Sytuacja ta dotyczy szczególnie dużych aglomeracji, w których systemy komunikacyjne są rozbudowane i opierają się na różnych środkach transportu. Poważne wyzwanie dla jednostek odpowiedzialnych za codzienne funkcjonowanie transportu publicznego stanowią różnego rodzaju sytuacje kryzysowe, zależne zarówno od stanu infrastruktury, jak i od czynników losowych. W ta-

kich przypadkach zdarza się, że pewien ciąg komunikacyjny zostaje przerwany, w związku z czym wymagana jest interwencja osoby zarządzającej ruchem w postaci awaryjnego rozdysponowania pojazdów aktualnie znajdujących się na trasach. Nieprawidłowe rozwiązanie problemu lub jego brak może doprowadzić do destabilizacji funkcjonowania całego układu komunikacyjnego i w konsekwencji spowodować po stronie przewoźnika znaczące straty finansowe oraz wizerunkowe.

Tematyka artykułu związana jest z kilkoma niezależnymi nurtami badań naukowych. Należą do nich między innymi: analiza funkcjonowania ruchu drogowego, teoria grafów oraz planowanie tras. Przykładem pokrewnego podejścia jest odporne planowanie tras pojazdów samochodowych w ruchu miejskim [1] i jego wykorzystanie w czasie rzeczywistym [2] oraz system planowania i monitorowania w intermodalnym transporcie towarów [3]. Jednym z zaproponowanych rozwiązań w odniesieniu do transportu publicznego jest system zarządzania komunikacją autobusową oparty na procesach stochastycznych [4]. Warto również wspomnieć o klasyfikacji systemów wspomaganie decyzji w transporcie, która obejmuje między innymi planowanie rynku, zarządzanie flotą pojazdów oraz konstrukcję rozkładów jazdy [5]. Przykładem pokrewnej pracy z obszaru transportu szynowego jest, oparty na rozmytych sieciach Petriego, system wspomaganie decyzji w sytuacji czasowego zamknięcia odcinka torów kolejowych [6]. Rozpatrywano również problem ustalania lokalizacji zajezdni tramwajowych [7], a także kwestię optymalnego rozdysponowania wagonów tramwajowych na zajezdni oraz ich ustawienia w odpowiedniej kolejności do wyjazdu [8–9].

Analiza sytuacji kryzysowych w transporcie miejskim

Zgodnie z encyklopedyczną definicją transport publiczny stanowi zespół czynności związanych z przemieszczaniem osób za pomocą odpowiednich środków, powszechnie dostępny za odpowiednią opłatą [10]. Definicja ta wprawdzie nie odpowiada w stu procentach dzisiejszym realiom, ponieważ w ostatnich latach kilka polskich miast (np. Żory [11]) zdecydowało się na wprowadzenie bezpłatnej komunikacji miejskiej, ale pozostałe sformułowania nie pozostawiają wątpliwości co do przeznaczenia opisywanego rozwiązania.

Zasady organizacji komunikacji miejskiej w Polsce określa ustawa z dnia 16 grudnia 2010 roku o publicznym transporcie zbiorowym. Rozrózono w niej pojęcie organizatora jako jednostki samorządu terytorialnego zapewnia-

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2017.

² Artykuł stanowi podsumowanie wyników pracy magisterskiej przygotowanej pod opieką prof. dr hab. inż. Antoniego Ligęzy, która w Konkursie na najlepszą pracę dyplomową I i II stopnia w dziedzinie transportu dla szkół wyższych Krakowa w roku 2017 uzyskała III nagrodę w grupie tematycznej *Procesy transportowe*.

jącej funkcjonowanie transportu publicznego oraz operatora, którego zadaniem jest przewóz osób na linii komunikacyjnej określonej w umowie z organizatorem [12]. W wielu miastach Polski stosuje się model, zgodnie z którym organizator płaci operatorowi za usługę przewozową na podstawie liczby tzw. wozokilometrów, to znaczy długości tras wyrażonej w kilometrach przemnożonej przez liczbę kursów na tych trasach.

Istnieje wiele czynników, które mogą negatywnie wpłynąć na kursowanie komunikacji miejskiej. Ze względu na swoją specyfikę komunikacja publiczna podatna jest na różnego rodzaju utrudnienia. Autorzy pracy [13] proponują podział sytuacji kryzysowych na cztery grupy, ze względu na czynniki wywołujące zdarzenia:

- system komunikacyjny – przykładami takich sytuacji mogą być problemy natury ekonomicznej i prawnej podmiotu odpowiedzialnego za transport publiczny, a także awarie sieci komputerowych związanych z pobieraniem opłat za przejazdy lub informację pasażerską;
- tabor – do tej grupy zalicza się awarie pojazdów komunikacji miejskiej, przeładowanie taboru w związku z wydarzeniami organizowanymi w mieście oraz wypadki drogowe;
- infrastruktura – tego typu zakłócenia to na przykład krótko- lub długoterminowe zamknięcia odcinków tras, awarie infrastruktury związane z warunkami pogodowymi, przerwy w dostawie energii elektrycznej, blokady tras przez inny pojazd oraz wysokie natężenie ruchu;
- czynnik ludzki – ostatnia grupa zdarzeń zawiera przede wszystkim wszelkiego rodzaju dolegliwości zdrowotne, które mogą zakłócić prowadzenie pojazdów, jak również błędy ludzkie, strajki oraz ataki terrorystyczne.

Ze względu na zakres pracy pominięto sytuacje odnoszące się do sieci komunikacyjnej jako całości. Skupiono się natomiast na zdarzeniach kwalifikujących się do grup 2–4, których efektem jest czasowe wyłączenie z eksploatacji danego odcinka sieci. Przykładem jednej z takich sytuacji jest kolizja dwóch tramwajów, do której doszło w czerwcu 2006 roku w Katowicach-Zawodziu. Po przyjeździe służb kontroli ruchu obydwa wagony zostały odholowane do zajezdni bez pasażerów. Transport rozbitego wagonu przedstawiono na fotografii 1.

Producenci wagonów tramwajowych oraz infrastruktury torowo-sięciowej stosują różnego rodzaju rozwiązania mające na celu zminimalizowanie potencjalnych skutków sytuacji kryzysowej. W przypadku taboru może to być pełna dwukierunkowość (zastosowanie kabin motorniczego na obydwu końcach oraz drzwi po obu stronach wagonu) lub możliwość przejazdu kilku kilometrów na bateriach, bez napięcia z sieci trakcyjnej [14]. Innym rozwiązaniem jest kursujący po jednej szynie tramwaj na gumowych kołach, wyposażony w kierownicę oraz rezerwową silnik Diesla. Tego rodzaju pojazdy kursują we francuskim mieście Caen



Fot. 1. Wagon nr 732 spychany do zajezdni po kolizji z innym tramwajem, 2006 r.
Źródło: zbiory własne

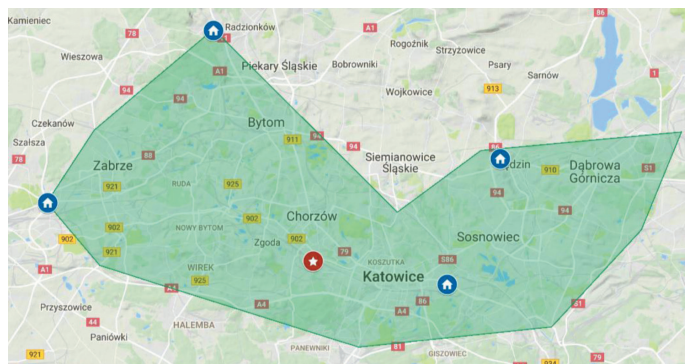
i w sytuacjach awaryjnych mogą poruszać się niezależnie od szyny prowadzącej [15]. Rozwiązania minimalizujące ryzyko wystąpienia sytuacji kryzysowej w obszarze infrastruktury to przede wszystkim wydzielone torowiska i jak największe odseparowanie linii tramwajowych od ruchu ulicznego. Ciągłość dostaw energii elektrycznej zapewnia się poprzez możliwość zasilania danego odcinka sieci z kilku stacji prostownikowych. Liczba zerwań przewodu jezdnego może być natomiast zminimalizowana w wyniku zastosowania sieci skompensowanej, w której następuje samoczynna regulacja naciągu sieci trakcyjnej.

Analizowana sieć komunikacyjna

Sytuacje kryzysowe mogą stanowić szczególne utrudnienie dla miejskiego transportu szynowego, a zwłaszcza tramwajów, które najczęściej poruszają się w ruchu ulicznym. Przyczynami takiego stanu są między innymi: brak możliwości omięcia lub wyprzedzenia uszkodzonego pojazdu, brak lub mała liczba torów technicznych (nieużywanych liniowo) w miastach, uzależnienie od ruchu drogowego na skrzyżowaniach lub torowiskach w jezdni oraz zewnętrzne dostawy energii elektrycznej (jedynie nowoczesne wagony tramwajowe umożliwiają przejazd na krótkim odcinku, korzystając z baterii akumulatorów [14]). Do opisu ruchu tramwajowego konieczne jest użycie pojęcia pociągu (niekiedy określanego wozem lub brygadą), które może być opisane w sposób następujący: „Pociąg jest to wagon lub skład wagonów poruszający się zgodnie z rozkładem jazdy lub zgodnie z poleceniami służb kontroli ruchu, na określonej trasie, wykonujący kursy na danej linii bądź przejazdy pozaplanowe”.

Mając na uwadze powyższe ograniczenia oraz możliwość obserwacji działania rzeczywistego układu komunikacyjnego, dalszą analizę opisywanego problemu oparto na przykładzie sieci tramwajowej w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym. Jest to największy system tramwajowy w Polsce, obejmujący 13 miast i łącznie 336 km toru pojedynczego [16]. Śląsko-dąbrowska sieć tramwajowa stanowi własność przedsiębiorstwa Tramwaje Śląskie SA i obejmuje cztery zajezdnie: w Będzinie, Bytomiu, Gliwicach oraz Katowicach. W sierpniu 2016 roku Tramwaje Śląskie SA

posiadały łącznie 335 wagonów i uruchamiały w dni robocze 234 pociągi planowe na 29 liniach [17]. Przybliżony zasięg sieci tramwajowej w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym przedstawiono na rysunku 1. Kolorem czerwonym zaznaczono siedzibę spółki, a kolorem niebieskim poszczególne zajezdnie.



Rys. 1. Obszar funkcjonowania komunikacji tramwajowej w GOP
Źródło: opracowanie własne na podstawie Map Google

Cechą charakterystyczną tego systemu komunikacyjnego jest obecność odcinków jednotorowych, po których tramwaje kursują naprzemiennie, w obydwu kierunkach. Ruch na tego typu odcinkach regulowany jest poprzez rozkład jazdy, zgodnie z którym pociągi muszą się mijać w określonym miejscu i czasie, lub poprzez tzw. sygnalizację międzymijankową. Taka budowa sieci ogranicza maksymalną częstotliwość kursowania pociągów i w przypadku zakłóceń może znacząco utrudnić funkcjonowanie komunikacji. Na fotografii 2 przedstawiono początek odcinka jednotorowego – w prawym górnym rogu zdjęcia widoczny jest sygnalizator świetlny zezwalający na wjazd.

Najpopularniejszym typem taboru śląsko-dąbrowskiej sieci tramwajowej są wagony typu 105Na oraz ich liczne modernizacje, które kursują pojedynczo lub w trójce podwójnej. Skład tego typu wagonów, przejeżdżający przez nieistniejący dziś odcinek jednotorowy w Gliwicach, zilu-



Fot. 2. Katowice, wjazd na odcinek jednotorowy pl. Alfreda–Karlowicza
Źródło: zbiory własne



Fot. 3. Tabor tramwajowy w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym: a) skład wagonów typu 105Na, b) Pesa 2012N

Źródło: zbiory własne

strowano na fotografii 3a. Najnowocześniejszymi tramwajami w spółce są natomiast wagony typu 2012N produkcji bydgoskiej firmy Pesa, które dostarczono w 2014 roku w ramach programu modernizacji współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej. Jeden z tych wagonów, wykonujący jazdy próbne przed rozpoczęciem służby liniowej, przedstawiono na fotografii 3b.

Ponad 90% taboru tramwajowego spółki Tramwaje Śląskie stanowią wagony jednokierunkowe [17], w związku z tym, w większości przypadków zawracanie pociągu musi odbywać się na pętli lub z wykorzystaniem trójkąta torowego, tj. takiego układu torów, za pomocą którego zmiana kierunku jazdy odbywa się poprzez cofanie. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność zabezpieczenia cofania przez osobę uprawnioną (innego motorniczego, kontrolera ruchu itp.) lub wykorzystania tylnego pulpitu manewrowego tramwaju, jeżeli wagon jest w niego wyposażony [18].

Ruchem tramwajowym zarządzają dyspozytorzy, którzy w Tramwajach Śląskich pełnią służbę całodobowo w każdej zajezdni. Ich zadaniem jest utrzymanie prawidłowego (zgodnego z rozkładem jazdy) funkcjonowania komunikacji tramwajowej na terenie podległego im rejonu. W przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowej, w pierwszej kolejności powiadamiany jest dyspozytor ruchu odpowiedniego rejonu. W zależności od orientacyjnego czasu usunięcia awarii dyspozytor podejmuje decyzję o wyłączeniu danego odcinka z ruchu. Jeżeli utrudnienie jest chwilowe (np. spowodowane tymczasowym brakiem napięcia w sieci trakcyjnej), to pociągi pozostają na swoich trasach. W przeciwnym przypadku, np. gdy wystąpi wypadek drogowy lub poważne uszkodzenie torowiska, pociągi kierowane są innymi drogami.

Alternatywna trasa przejazdu wybierana jest przez dyspozytora na podstawie poniższych kryteriów:

- jak największe pokrycie z właściwym przebiegiem danej linii,
- czas przejazdu na zmienionej trasie nieprzekraczający znacząco czasu wykonania kursu w rozkładzie jazdy,
- jak najmniej odcinków jednotorowych,
- brak zbędnego postoju na docelowym przystanku końcowym,
- brak możliwości wysłania zbyt wielu pociągów na tę samą trasę ze względu na ograniczoną wydajność podstacji trakcyjnych,
- jak najmniejsze zakłócenia w kursowaniu innych linii.

Powyższe kryteria zostały sformułowane na podstawie obserwacji praktyk stosowanych w przedsiębiorstwie. Nie istnieją jednolite wskaźniki jakości ani procedury pozwalające na wyznaczenie optymalnej trasy alternatywnej w przypadku czasowego wyłączenia z ruchu jednego z odcinków sieci.

Model matematyczny układu komunikacyjnego

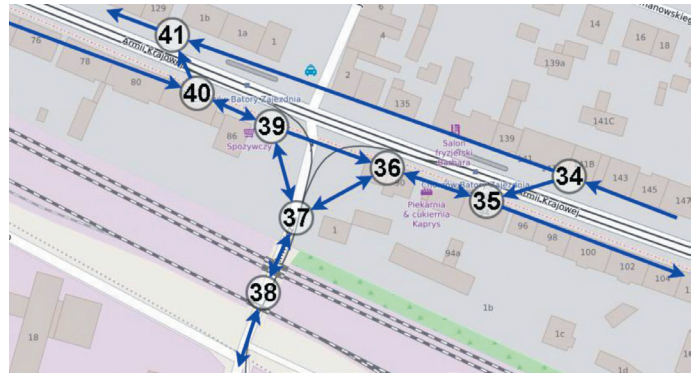
Wykorzystany w tej pracy model matematyczny sieci tramwajowej utworzony w oparciu o graf mieszany opisano szczegółowo w pracy [19]. Graf mieszany łączy cechy grafu skierowanego i nieskierowanego, zawierając dwa rodzaje krawędzi. Stanowi jeden ze sposobów reprezentacji matematycznej rzeczywistego układu drogowego [2] oraz może zostać wykorzystany do opisu układu torów tramwajowych.

Model grafowy sieci tramwajowej w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym utworzono na podstawie schematu linii spółki Tramwaje Śląskie SA [20]. Ze względu na fakt, iż praca dotyczy wyznaczania tras linii komunikacyjnych, pominięto modelowanie układów torowych poszczególnych zajezdni. Budowa modelu składała się z następujących etapów:

1. umieszczenie wierzchołka grafu we wszystkich miejscach, gdzie znajduje się:
 - a. rozjazd torowy (rozwidlenie lub złączenie dwóch torów),
 - b. mijanka przed wjazdem na odcinek jednotorowy,
 - c. przystanek końcowy (miejsce, gdzie istnieje możliwość zmiany kierunku jazdy),
 - d. tor postojowy,
 - e. przystanek początkowy,
 - f. brama wjazdowa lub wyjazdowa zajezdni;
2. połączenie skrajnych punktów odcinków dwukierunkowych krawędziami nieskierowanymi;
3. połączenie pozostałych wierzchołków krawędziami skierowanymi zgodnie z zasadą, że ruch tramwajowy odbywa się prawym torem.

Krawędziom przyporządkowano odległości w kilometrach oraz czasy przejazdu w minutach na podstawie rozkładów jazdy Komunikacyjnego Związku Komunalnego GOP obowiązujących w godzinach 5–23 [21]. W przypadku fragmentów tras dwutorowych łączących wierzchołki w obrębie tego samego przystanku przyjęto długość odcinka i czas przejazdu równe zero. Zerowe wektory wag przyjęto także dla krawędzi prowadzących do wjazdów na odcinki jednotorowe.

Istotny problem, który pojawił się w trakcie tworzenia modelu matematycznego, stanowiła reprezentacja skrzyżowań tras dwutorowych z odcinkami jednotorowymi. Przykład reprezentacji matematycznej fragmentu sieci z odcinkami jednotorowymi przedstawiono na rysunku 2. Z przedstawionego fragmentu grafu wynika, że istnieje ścieżka przechodząca od strony wschodniej przez wierzchołki 34, 35 i biegnąca z powrotem na wschód. W rzeczywistości przejazd wagonem jednokierunkowym po takiej trasie nie



Rys. 2. Układ torowy okolic zajezdni tramwajowej w Chorzowie Batorym

Źródło: opracowanie własne na podstawie Openstreetmap

jest dopuszczalny, ponieważ wymagałby zmiany kierunku jazdy, która możliwa jest tylko na pętli lub na trójkącie torowym.

W celu wyeliminowania błędu w postaci zmiany kierunku jazdy w miejscu, gdzie nie jest to fizycznie możliwe, należało uzupełnić model o zbiór ścieżek zabronionych. W zbiorze tym umieszczono wszystkie ścieżki składające się z dwóch krawędzi skierowanych, gdy obydwie są incydentne z tym samym punktem końcowym krawędzi nieskierowanej. Uzupełnienie modelu o dodatkowe ograniczenia konieczne było w dwóch kolejnych przypadkach. Pociąg skręcający w lewo, jadąc od wschodu w kierunku południowym lub od południa w kierunku zachodnim, musi skorzystać z krótkiego odcinka trasy dwutorowej eksploatowanego w dwóch kierunkach. Odcinki te nie są jednak jednotorowe, więc zgodnie z przyjętym wcześniej założeniem ich wagi są zerowe. Podobnie jak w poprzednim przypadku, istnieje możliwość wytyczenia w grafie takich ścieżek, które w rzeczywistości nie będą realizowalne ze względu na ograniczenia układu torowego. Pierwszy warunek wyklucza niedozwoloną zmianę kierunku jazdy, jadąc od strony zachodniej przez punkty 40 i 41. W analizowanym przypadku układ torowy nie pozwala także na wytyczenie ścieżek przebiegających przez ciągi wierzchołków: (36,37,39), (37, 39, 36), (39, 36, 37) oraz (39, 37, 36). Rozwiązaniem tego problemu jest dodanie kolejnych elementów do zbioru ścieżek zabronionych, określonych przez następujące warunki:

- wjazd na krawędź nieskierowaną o niezerowym wektorze wag z dowolnej krawędzi, której wagi są różne od zera;
- wjazd na krawędź skierowaną lub o niezerowym wektorze wag, podczas gdy w danym punkcie istnieje krawędź nieskierowana o zerowym wektorze wag.

Podsumowując, ścieżką zabronioną jest ścieżka, której dowolny trzejelementowy pociąg spełnia co najmniej jeden z trzech sformułowanych warunków. Innymi słowy, podczas wyznaczania tras należy przestrzegać następujących zasad:

1. Przejazd z jednego odcinka dwutorowego na drugi nie jest możliwy, jeżeli przebiega przez punkt końcowy odcinka dwukierunkowego;
2. Wjazd na odcinek jednotorowy może się odbywać tylko z odcinka o zerowych wagach;

3. Jeżeli w danym punkcie możliwy jest wjazd na odcinek dwukierunkowy o zerowych wagach, to nie można wjechać na inny odcinek.

Sformułowane założenia pozwoliły na ustalenie zasad wyznaczania tras przebiegających przez odcinki jednotorowe, gdyż zgodnie z warunkiem nr 2 nie jest możliwy bezpośredni przejazd z jednego odcinka jednotorowego na drugi. W tym celu, każde dwa sąsiednie odcinki jednotorowe, pomiędzy którymi istnieje możliwość przejazdu bez zmiany kierunku jazdy, połączono krawędzią nieskierowaną o zerowych wagach. Taka modyfikacja modelu wymagała każdorazowego dodania nowego wierzchołka, który na rysunku 2 oznaczono numerem 38.

Na podstawie definicji Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej [22] linię tramwajową można określić jako trasę łączącą krańcowe punkty przebiegu pociągów, oznaczoną cyfrowo lub literowo. W utworzonym modelu grafowym odpowiada to ścieżce łączącej dwa wierzchołki reprezentujące przystanki końcowe. W celu identyfikacji przystanków końcowych na zbiorze wierzchołków grafu określono funkcję logiczną przyjmującą wartość 1, gdy dany wierzchołek odpowiada przystankowi końcowemu, oraz 0 w pozostałych przypadkach. W rzeczywistych układach komunikacyjnych przebiegi linii mogą różnić się w zależności od kierunku jazdy oraz kursu (oznaczone tym samym numerem mogą być na przykład zjazdy do zajezdni). W tym celu wprowadzono pojęcie wariantu, które szczegółowo określa przebieg danej trasy. W utworzonym modelu grafowym wariantem linii jest zatem ścieżka łączące dwa wierzchołki odpowiadające przystankom końcowym. Linię tramwajową można natomiast określić jako zbiór wariantów oznaczony określonym numerem.

Pociąg odpowiada pojazdowi poruszającemu się w sieci tramwajowej. Pojęcie to szczegółowo wyjaśnia definicja przedstawiona w poprzednim rozdziale. Podczas badań nad opracowaniem modelu skupiono się na pociągach planowych, to znaczy takich, które kursują na określonych liniach według przygotowanego wcześniej rozkładu jazdy. W opisywanym modelu pociąg planowy określają następujące parametry:

- numer pociągu – liczba, w przypadku Tramwajów Śląskich składająca się zazwyczaj z numeru linii i numeru kolejnego [17] – przykładowo, pierwszy pociąg na linii 13 ma numer 131;
- typ taboru – określa liczbę i rodzaj wagonów;
- rozkład jazdy – zawiera godziny odjazdów z przystanków początkowych; może być przedstawiony jako zbiór par (t_p, w_i) , gdzie t_p jest czasem odjazdu, a w_i odpowiednim wariantem linii określonej przez numer pociągu.

Typ taboru obsługującego dany pociąg pozwala na określenie jego długości, która służy do określenia liczby pociągów mieszczących się w danym punkcie. Liczba ta nie może przekroczyć maksymalnej pojemności wierzchołka.

Metoda szukania rozwiązań

W przypadku zaistnienia sytuacji kryzysowej może zająć potrzeba czasowego wyłączenia danego odcinka z sieci. Odpowiada to czasowemu usunięciu jednej lub większej liczby krawędzi grafu. W tej sytuacji pociągi, których trasa zawierała zablokowany odcinek, muszą zostać skierowane na trasy alternatywne. Zadanie wyznaczenia trasy polega na znalezieniu odpowiedniego punktu docelowego oraz ścieżki do tego punktu, a następnie przedstawienia propozycji trasy powrotnej do jednego z przystanków końcowych, który jest osiągalny.

W pierwszej kolejności należy określić krawędź odpowiadającą zablokowanemu odcinkowi oraz czas wstrzymania ruchu, który stanowi jednocześnie czas rozpoczęcia poszukiwania. Analiza funkcjonowania sieci w sytuacji kryzysowej prowadzona jest dla określonego dnia, dlatego wystarczające jest, aby czas wyrażany był z dokładnością do minuty, licząc od godziny 0:00 tego dnia. Zakładając, że lokalizacja pociągu jest znana, w kolejnym kroku należy wyznaczyć podścieżkę znalezionej wariantu, rozpoczynającą się w najbliższym punkcie decyzyjnym. Wyznaczenie trasy alternatywnej jest konieczne, jeżeli zablokowany odcinek należy do aktualnego wariantu. Sformułowano wskaźnik jakości, który określa podobieństwo dwóch ścieżek i jest określony wzorem:

$$Q(p_0, p_a, p_c, v_a) = \frac{d(p_c) + \varphi(v_a)}{d(p_0) - d(p_a)}$$

gdzie:

- p_0 jest trasą pierwotną ujętą w rozkładzie jazdy,
- p_a jest wyznaczoną trasą alternatywną,
- p_c jest częścią wspólną ścieżek p_0 i p_a ,
- v_a jest punktem końcowym ścieżki p_a ,
- $d(p)$ określa długość ścieżki p ,
- $\varphi(v)$ przyjmuje wartość 1 gdy v jest równy punktowi końcowemu ścieżki p_0 i 0 w przeciwnym przypadku.

Ze względu na fakt istnienia zbioru ścieżek zabronionych nie jest możliwe bezpośrednie zastosowanie jednego z dostępnych algorytmów wyznaczania ścieżek w grafie. Jednym z dostępnych rozwiązań jest zastosowanie zmodyfikowanego algorytmu Dijkstry, który wyklucza ścieżki zabronione podczas wyszukiwania. Na podstawie pracy [23] sformułowano algorytm wyznaczający najkrótszą trasę przejazdu pomiędzy dwoma punktami sieci tramwajowej. Eliminacja ścieżek zabronionych odbywa się poprzez nadawanie określonym wierzchołkom nieskończonych cech, jeżeli prowadzi do nich ścieżka zabroniona.

Wyznaczenie proponowanej trasy alternatywnej polega na usunięciu zablokowanej krawędzi z modelu sieci. Następnie dla każdego wierzchołka określonego jako przystanek końcowy, należy postępować w następujący sposób:

- przyjąć $Q_{max} = 0$;
- wyznaczyć ścieżkę do v_{ii} o najmniejszej długości;
- obliczyć czas przejazdu do v_{ii} z uwzględnieniem oczekiwania na wolny odcinek jednotorowy;

- jeżeli po przyjeździe do v_i przekroczona zostanie dopuszczalna pojemność, wybrać następną wierzchołek i przejść do punktu 1;
- wyznaczyć wskaźnik jakości Q dla wygenerowanej ścieżki:
 - jeżeli $Q > Q_{max}$, oznaczyć aktualną ścieżkę jako p_a i przyjąć $Q_{max} = Q$,
 - jeżeli $Q = Q_{max}$ należy wybrać ścieżkę o mniejszej różnicy długości w porównaniu z trasą podstawową lub ścieżkę, na której końcu znajduje się mniej pociągów;
- zalecana trasa to p_a .

Po wyznaczeniu rekomendowanej trasy alternatywnej wyznaczana jest zalecana trasa powrotna. Jako jej początek przyjmuje się punkt końcowy trasy oraz czas przyjazdu do tego punktu. Przy wyznaczaniu trasy powrotnej uwzględnia się czas oczekiwania na opuszczenie przystanku końcowego (jeżeli jest zajmowany przez inne pociągi) oraz najbliższy osiągalny planowy odjazd dla danego pociągu.

System wspomaganie decyzji

Zadaniem zaprojektowanej aplikacji jest wsparcie dyspozytora w procesie zarządzania ruchem tramwajowym w czasie występowania przerw w ruchu spowodowanych sytuacjami kryzysowymi. Przewidziano jednego użytkownika aplikacji, który korzysta z niej na swoim stanowisku pracy, oraz następujące scenariusze użycia:

- wyświetlanie informacji o sieci: parametry punktów decyzyjnych i odcinków,
- lokalizacja pociągów na trasach,
- wyznaczanie alternatywnej trasy przejazdu danego pociągu przy wystąpieniu zakłócenia na określonym odcinku,
- powrót danego pociągu do planowego kursowania.

Wejściami programu są dane wpisane przez użytkownika oraz pliki zawierające model sieci tramwajowej. Przyjęto założenie, że model sieci wgrany jest do systemu z grupy plików źródłowych podczas jego uruchomienia. Projektowany system napisano w powszechnie stosowanym języku Java, z wykorzystaniem środowiska IntelliJ IDEA 14.1.1 oraz pakietu Java SDK 1.8. Do wykonania interfejsu graficznego posłużyła biblioteka Java Swing. Do reprezentacji modelu sieci wykorzystano bibliotekę JUNG (*Java Universal Network/Graph Framework*) [24], dedykowaną do wykonywania operacji na grafach. Prosty interfejs graficzny aplikacji składa się z okien dialogowych i wyświetla wyniki zapytań w postaci tekstu. Zgodnie z założeniem użytkownik programu cechuje się dobrą znajomością danego układu komunikacyjnego. Można zatem przypuszczać, że wizualizacja procesu wyznaczania trasy alternatywnej nie poprawiłaby użyteczności systemu, a jedynie wpłynęłaby negatywnie na czas wykonywania algorytmu.

Informacje o modelu matematycznym sieci tramwajowej przechowywane są w czterech plikach CSV, z których każdy odpowiada za tworzenie obiektów określonej klasy.

W celu prawidłowego działania aplikacji niezbędne jest zdefiniowanie poniższych plików:

- plik *vertices.csv* przechowuje informacje o wierzchołkach grafu,
- plik *edges.csv* przechowuje informacje o krawędziach,
- plik *lines.csv* przechowuje informacje o liniach tramwajowych,
- plik *tramcars.csv* przechowuje informacje o pociągach wraz z ich rozkładami jazdy.

Pierwszy wiersz każdego z plików źródłowych stanowi objaśnienie wykorzystywanych kolumn i jest pomijany podczas ładowania danych do systemu. Fragment pliku *lines.csv*, przedstawiający zapis linii 0 oraz jej czterech wariantów, przedstawiono na rysunku 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	ID	Variant	Description	Vertices...								
2	0	0	0 RKT - Pl. Wolności	702	704	709	6001	6003	6012	6005		
3	0	1	1 Pl. Wolności - Stadion	6005	6013	6004	6019	6021	6023	6025	6027	6029
4	0	2	2 Stadion - Pl. Wolności	6029	6030	6028	6024	6022	6020	6003	6012	6005
5	0	9	9 Pl. Wolności - RKT	6005	6013	6004	6002	710	703	701		

Rys. 3. Plik źródłowy zawierający definicje linii, otwarty w edytorze arkuszy kalkulacyjnych

Po uruchomieniu pojawia się główne okno programu oraz komunikat o poprawnym załadowaniu modelu sieci (rys. 4). Wywołanie określonej funkcji odbywa się poprzez naciśnięcie odpowiedniego przycisku.

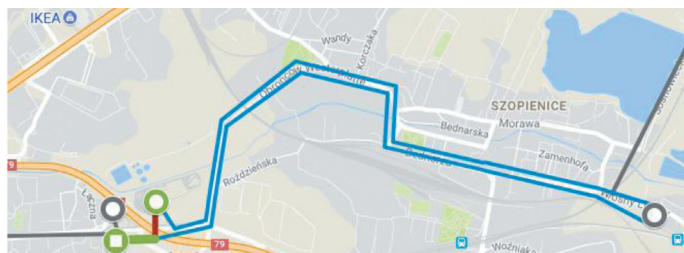


Rys. 4. Ekran początkowy aplikacji uruchomionej w systemie Windows

Najważniejszą funkcją programu, którą jest wyznaczenie alternatywnej trasy przejazdu (techniczne aspekty aplikacji, jak i jej pozostałe funkcje opisano szerzej w pracy [25]), uruchamia się poprzez naciśnięcie przycisku *Trasa alternatywna*. Użytkownik pytany jest o czas, numer pociągu, dla którego trasa jest wyznaczana, oraz numer zablokowanego odcinka. W odpowiedzi otrzymuje przebieg proponowanej trasy, jej długość oraz przewidywany rzeczywisty czas przejazdu, obliczony z uwzględnieniem pozostałych pociągów kursujących na tej trasie. Następnie przedstawiana jest propozycja kolejnego kursu, zakładająca powrót na stałą trasę. Czas rozpoczęcia tego kursu jest równy czasowi przyjazdu na dany przystanek końcowy (jeżeli wybrana

krańcówka jest pusta) lub odjazdowi ostatniego pociągu, który odbywał wcześniej postój na tym przystanku.

Wygenerowana trasa dowodzi, że istnieje możliwość dojazdu do punktu docelowego z wykorzystaniem innej ścieżki. Wynik działania algorytmu ilustruje rysunek 5. Kolorem zielonym oznaczono trasę podstawową: kwadrat oznacza przystanek początkowy (Zawodzie Zajezdnia), kółko oznacza przystanek końcowy (Zawodzie Zajezdnia Dysp.). Kolorem czerwonym zaznaczono odcinek wyłączony z ruchu, a kolorem niebieskim wygenerowana trasa. Pozostałe trasy i przystanki końcowe opisano kolorem szarym.



Rys. 5. Wygenerowana trasa alternatywna dla pociągu 01

Źródło: opracowanie własne na podstawie map Google

Podsumowanie

W artykule zaproponowano rozwiązanie, które pozwala na usprawnienie pracy osób nadzorujących ruch tramwajów. Analiza problemu przeprowadzona została w oparciu o sieć tramwajową Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, która jest największym tego typu systemem w Polsce oraz jednym z najbardziej złożonych ze względu na dużą liczbę odcinków jednotorowych. Wykonany model matematyczny układu komunikacyjnego oraz sformułowane zasady jego tworzenia pozwalają na przedstawienie za pomocą grafu dowolnej sieci tramwajowej, zawierającej zarówno trasy dwutorowe, jak i jednotorowe z mijankami. Korzystanie z zaproponowanej aplikacji możliwe jest na różnych systemach operacyjnych, bez konieczności stosowania dodatkowego sprzętu. Jej zastosowanie w praktyce pozwala na szybsze niż dotychczas reagowanie na występujące sytuacje kryzysowe. Wyznaczanie awaryjnych tras przejazdu w oparciu o jednolite kryteria może doprowadzić do lepszego wykorzystania zasobów przedsiębiorstwa oraz uniknięcia znaczących strat finansowych po stronie przewoźnika. W ramach przyszłych prac planowane jest dodanie możliwości symulacyjnego wyznaczania wag dla poszczególnych kryteriów wyboru trasy alternatywnej oraz rozszerzenie aplikacji o możliwość wyboru jednej z kilku sugerowanych tras.

Literatura

- Ernst S., Ligęza A., *A rule-based approach to robust granular planning*, "International Multiconference on Computer Science and Information Technology", Wisła 2008.
- Ernst S., *Artificial Intelligence Techniques in Real-Time Robust Route Planning*, praca doktorska, AGH, Kraków 2009.
- Funk P., Vierke G., Bürckert H.J., *An Intercompany Dispatch Support System for Intermodal Transport Chains*, "33rd Hawaii International Conference on System Sciences", Maui 2000.
- Adamski A., *DISCON: Public Transport Dispatching Robust Control*, "EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation", Porto 2014.
- Żak J., *Decision Support Systems in Transportation*, "Handbook on Decision Making", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2010.
- Fay A., *A Fuzzy Petri Net approach to decision-making in case of railway track closures*, "IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference", Vancouver 2001.
- Sawicki P., Kupka P., *Ustalanie lokalizacji zajezdni tramwajowej w systemie komunikacji miejskiej z zastosowaniem metody wspomaganie decyzji*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 6.
- Blasum U. et al., *Scheduling trams in the morning*, "Mathematical Methods of Operations Research", 1999, no 49(1).
- Winter T., Zimmermann U.T., *Real-time dispatch of trams in storage yards*, "Annals of Operations Research", 2000, no 96(1).
- Wielka Encyklopedia PWN – hasło: transport, tom 27, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- Żory – *Bezpłatna Komunikacja Miejska*, <http://zory.trasownik.net/> (dostęp 09.07.2016).
- Kruszyna M., *Niektóre aspekty nowej ustawy o publicznym transporcie zbiorowym*, „Przegląd Komunikacyjny”, 2011, nr 01–02.
- Drdla P., Bulíček J., *Crisis Situations in Urban Public Transport* "Perner's Contacts", 2012, no VII(4).
- Transport szynowy – niezależna strona informacyjna*, <http://www.transportszynowy.pl/> (dostęp: 09.07.2016).
- Innovative Technologies for Light Rail and Tram: A European reference resource*, University College London, <http://www.polisnetwork.eu/eu-projects/sintropher/> (dostęp: 12.10.2016).
- Drogoś J., *Charakterystyka sieci tramwajowej Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego*, „Tramwaje w Polsce”, Księży Młyn, Łódź 2013.
- Wojewódzki Przegląd Komunikacyjny*, <http://wpk.katowice.pl/> (dostęp 12.08.2016).
- Haładyj T., *Zwiększenie elastyczności i poprawa niezawodności sieci tramwajowej w Częstochowie. Studium funkcjonalno-przestrzenne urzędnictwa miejsca do zawracania tramwajów w centrum miasta*, Częstochowski Klub Miłośników Komunikacji Miejskiej, Częstochowa 2013.
- Wiśniewski P., Ligęza A., *An Approach to Robust Urban Transport Management. Mixed Graph-Based Model for Decision Support*, "International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing", Zakopane 2017.
- Schemat linii tramwajowych*, Tramwaje Śląskie SA, <http://www.tram-silesia.pl/www/index.php/26252/rr7472015/> (dostęp 21.12.2015).
- System Informacji Pasażerskiej*, Komunikacyjny Związek Komunalny GOP, <http://rozklady.kzkgop.pl> (dostęp 12.08.2016).
- Komunikacja w liczbach. Objaśnienia wybranych definicji*, Izba Gospodarcza Komunikacji Miejskiej, <http://ssl.igkm.com.pl/ankieta/definicje.pdf> (dostęp: 12.08.2016).
- Jaworski J., Palka Z., Szymański J., *Matematyka dyskretna dla informatyków. Część I: Elementy kombinatoryki*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2007.
- JUNG – Java Universal Network/Graph Framework*, <http://jung.sourceforge.net/> (dostęp: 12.08.2016).
- Wiśniewski P., Kluza K., Ligęza A., *Decision Support System for Robust Urban Transport Management*, "2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems", Prague 2017.